



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ELIMINACE VNITŘNÍHO PNUTÍ V
POLYKARBONÁTOVÝCH VÝLISCÍCH**

ELIMINATION OF INTERNAL STRESS IN THE POLYCARBONATE MOLDINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslav Selucký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jaroslav Selucký**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Chladil, CSc.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Eliminace vnitřního pnutí v polykarbonátových výliscích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popsání výroby polykarbonátových výlisků, vzniku vnitřního pnutí a dalšího zpracování pro eliminaci tohoto vnitřního pnutí a u typologicky daných výrobků (vnějších skel automobilových světlometů) s využitím měření v temperačních pecích pro posouzení možných příčin praskání výlisků.

Cíle diplomové práce:

S využitím experimentální metody určit hlavní faktory či technologické vlivy pro snížení vnitřního pnutí, které způsobuje praskání výlisků, a na základě těchto výsledků pak stanovit jejich vhodné kombinace pro eliminaci praskání.

Seznam literatury:

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.

EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

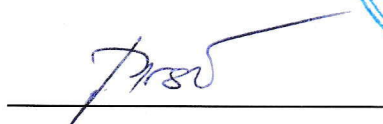
SOVA, Miloš a Josef KREBS. Termoplasty v praxi. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-86229-15-7.

MENGES, Georg a Paul MOHREN. How to Make Injection Molds. 2nd edition. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1993. 558 s. ISBN 1-56990-062-0.

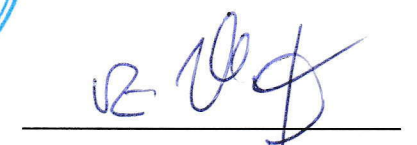
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 9. 11. 2016





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je věnována problematice přítomnosti vnitřního pnutí u dvoukomponentních vnějších čoček automobilových světlometů, vyráběných z polykarbonátu, technologií vstřikování plastů. Podrobněji je zaměřena na následné tepelné zpracování výrobků v temperačním zařízení, jež je využíváno, jako jedna z technologií, pro snižování vnitřního pnutí. Předmětem experimentu, je s využitím metody Desifn of Experiments (dále jen DoE), určit míru vlivnosti nastavitelných parametrů temperačního zařízení na výsledné snížení hodnot vnitřního pnutí. Míra vlivu parametrů je zkoumána a porovnána u dvou konstrukčně rozdílných druhů vnějších čoček.

Klíčová slova

vnitřní pnutí, polykarbonát, vstřikování plastů, DoE,

ABSTRACT

This diploma theses raises the issue of internal tension in two-component outer lense, which are made by injection of polycarbonate. The theses gives a more detail view on treatment of the lenses in heating ovens. Heating ovens have been used for decreasing the internal tension in lenses. The subject of the experiment is to determine the influences of the adjustable parameters of the heating oven. The Experiment will be taken by DoE method. The influence of the adjustable parameters is researched and compared among the two types of outer lense with different type of design.

Key words

Internal tension, polycarbonate, injection molding, DoE

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SELUCKÝ, Jaroslav. *Eliminace vnitřního pnutí v polykarbonátových výliscích*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 71 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Eliminace vnitřního pnutí v polykarbonátových výliscích** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jaroslav Selucký

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu, panu doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc., za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat oddělení předvýroby společnosti Automotive Lighting s.r.o. za poskytnutí potřebných podkladů a možnosti provést experimentální měření s využitím jejich zařízení. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a nejbližším za podporu a toleranci, které se mi od nich dostávalo po celé období studia.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH	6
ÚVOD	7
1 SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU A TEORIÍ	8
1.1 Popis problematiky	8
1.2 Cíl práce	8
1.3 Teorie potřebná pro uvedení do problematiky vnitřního pnutí ve výrobcích z polykarbonátu	9
1.3.1 Polymery	9
1.3.2 Polykarbonát	11
1.3.3 Zpracování polykarbonátu vstřikováním	12
1.3.4 Vnitřní pnutí	20
1.3.5 Sdílení tepla	25
1.3.6 DOE	26
1.3.7 Realizace experimentů	30
2 SEZNÁMENÍ S FIREMNÍM PROSTŘEDÍM	31
2.1 Proces výroby vnějších čoček automobilových světlometů	31
2.2 Dvoukomponentní vnější čočky	37
2.2.1 2k skla s klasickým designem	37
2.2.2 2k skla s konstrukčním řešením spoje - skinmoulding	38
2.3 Temperační zařízení pro eliminaci vnitřního pnutí	39
2.3.1 Popis zón temperačního zařízení	39
2.3.2 Základní části temperačního zařízení	40
2.3.3 Nastavování pece a teplotní průběh	41
2.4 Popis testu na přítomnost a velikost vnitřního pnutí	43
2.4.1 Test na přítomnost vnitřního pnutí většího než 5 MPa	44
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	46
3.1 Rozvržení experimentální části	47
3.2 Demonstrativní měření	47
3.3 Experiment č. 1	48
3.3.1 Návrh experimentu č. 1	48
3.3.2 Provedení a analýza experimentu č. 1	50
3.3.3 Zhodnocení experimentu č. 1	54
3.4 Experiment č. 2	56
3.4.1 Návrh experimentu č. 2	56
3.4.2 Provedení a analýza experimentu č. 2	57
3.4.3 Zhodnocení experimentu č. 2	62
4 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	63
4.1 Náklady na výrobu při parametrech dle stávajícího předpisu:	63
4.2 Náklady na výrobu při nastavení nejvhodnějších parametrů testovaných v experimentu 2:	64
4.3 Ekonomické zhodnocení:	64
5 DISKUSE	65
5.1 Rozbor a srovnání výsledků experimentu č. 1 a experimentu č. 2	65
ZÁVĚR	66
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71

ÚVOD

Téma diplomové práce vzniklo na základě reálné potřeby řešení problému na předvýrobním oddělení jihlavské společnosti Automotive Lighting s.r.o., jež patří mezi přední světové výrobce automobilových světlometů. Automobilový průmysl patří k jednomu z nejrychleji rostoucích výrobních odvětví a neustále se v něm objevují a začínají využívat nové technologie a přístupy.

Světlomety se skládají z komponent, které jsou vyráběny zejména z plastu, technologií vstřikování plastických hmot. Výrobě jedné z hlavních komponent, sklu světlometu, se věnuje i tato diplomová práce.

Sklo světlometu je v praxi běžně používaný, avšak poněkud zavádějící název pro vnější čočku automobilového světlometu. Ty jsou totiž vyráběny rovněž technologií vstřikování plastických hmot, konkrétně polykarbonátu. Vnější čočka je komponentou, na jejíž kvalitu jsou kladeny skutečně vysoké nároky. Nejen že plní estetickou funkci, z níž vyplývají požadavky na složitě, do různých směrů vypouklé tvary, ale musí také plnit funkci ochranou. Vnější čočka je jedinou částí světlometu, která prakticky celou svou plochou čelí působení veškerých povětrnostních a ostatních vnějších vlivů a chrání před nimi vnitřní, často elektronické součásti. Tyto kvalitativní požadavky přímo souvisejí s náročností samotné výroby, kdy jejich dosažení předchází poměrně složitý výrobní proces. Diplomová práce se věnuje jedné z technologií tohoto procesu, a to temperování výrobků za účelem snížení jejich vnitřního pnutí.



Obr. 1 Vnější čočka světlometu

1 SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU A TEORIÍ

1.1 Popis problematiky

Jedním ze zásadních kvalitativních problémů, který je řešen v souvislosti s výrobou vnějších čoček světlometů, je přítomnost vnitřního pnutí o příliš vysoké hodnotě.

Vnitřní pnutí ve výrobcích vzniká již během samotného procesu vstřikování. Přítomnost vyšších hodnot tohoto pnutí snižuje mechanické vlastnosti výrobků, a tím jejich odolnost vůči vnějšímu namáhání. Během samovolného uvolňování vnitřního pnutí, běžně dochází k výrazným rozměrovým změnám výrobků, v extrémnějších případech pak může dojít i k jejich destrukci.

Při výrobě dvoukomponentních skel se již nedařilo udržet hodnotu vnitřního pnutí pod akceptovatelnou hranicí nastavením technologických parametrů vstřikování a na řadu přišly technologie snižující vnitřní pnutí následným zpracováním po vstřikování. Způsobů tohoto následného zpracování je několik, jedním z nich je tepelné zpracování v horkovzdušném temperačním zařízení, kterému se věnuje i tato diplomová práce. Jedná se o proces principiálně porovnatelný s žíháním ocelí, kdy se zahříváním výrobku, výdrží na určité teplotě a poté pozvolným ochlazováním, dosahuje snižování hodnot jeho vnitřního pnutí.

Tento proces následného zpracování lze řídit nastavováním parametrů temperačního zařízení. Díky dlouhodobějšímu využívání této technologie, existuje ve firmě předpis pro jejich nastavení. Předpis definuje určité rozmezí hodnot jednotlivých parametrů, jejichž nastavení s jistotou zaručovalo dosažení akceptovatelných hodnot vnitřního pnutí. Při vzorkové výrobě nového projektu tedy nebylo nutno dlouze hledat nastavení na ideální hodnoty parametrů, ale jednoduše se zařízení nastavilo na hodnoty vymezené předpisem. Finální ladění procesu pak probíhalo na již běžícím projektu, kdy se obvykle nastaví parametry, jež zaručí kompromis mezi dosahovanými hodnotami vnitřního pnutí, a co nejekonomičtějším provozem temperačního zařízení.

Problémy se objevily při vzorkové výrobě dvoukomponentních vnějších čoček s novým konstrukčním řešením překrytí materiálu, zvaným skinmoulding. Při nastavení temperačního zařízení na nejvyšší hodnoty povolené v interním předpisu nebylo možno dosáhnout uspokojivých výsledků a hodnoty vnitřního pnutí oscilovaly kolem povolené hranice. Požadavek na maximální velikost pnutí pak 40 % výrobků po tomto zpracování nesplňovalo vůbec.

Za účelem snížení zmetkovitosti vlivem přítomnosti vnitřního pnutí o nepovolené hodnotě, je třeba vytvořit nový předpis pro nastavování temperačních zařízení. Důležitými podklady pro jeho vytvoření budou závěry experimentu, provedeného v této práci.

1.2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je určení vlivů nastavitelných parametrů v procesu snižování vnitřního pnutí temperováním a určení jejich nejvhodnějších kombinací. Nově stanovený předpis a rozmezí jednotlivých hodnot musí vést ke stabilnímu

snížení hodnot vnitřního pnutí pod maximální povolenou míru, což vede tedy i ke snížení zmetkovosti při startu nového projektu. Předpis by se měl specializovat na nastavování temperačních zařízení pro vnější čočky s konstrukčním řešením skinmoulding.

1.3 Teorie potřebná pro uvedení do problematiky vnitřního pnutí ve výrobcích z polykarbonátu

1.3.1 Polymery

Polymery jsou látky, které lze z pohledu běžného uživatele, definovat jako látky nabízející zcela výjimečnou šíři spektra vlastností. Neméně široký je pak výčet jejich podob a využití. V určitém stupni zpracování se polymery nachází v kapalném stavu, který umožňuje udělit jim tvar odpovídající tvaru budoucího výrobku. Výsledný výrobek však prakticky slouží až ve stavu tuhém [1,2].

Polymery jsou makromolekuly, tedy látky s velkým počtem atomů vázaných chemickými vazbami do dlouhých řetězců. Tyto řetězce tvoří pravidelně se opakující části, které nazýváme stavební nebo monomerní jednotky. Počet stavebních jednotek udává polymerační stupeň, přičemž za polymery považujeme látky s hodnotou tohoto polymeračního stupně vyšší než 10. Polymery většinou obsahují atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru i jiných prvků [1,3,4].

Vlastnosti polymerů:

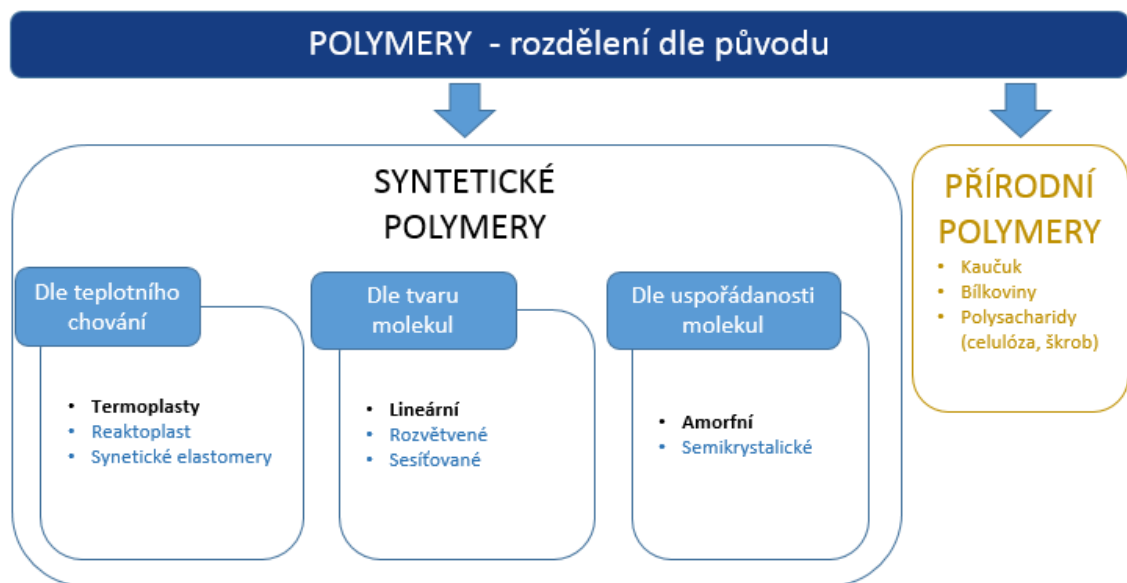
- pevné nebo elastické;
- transparentní, průsvitné nebo neprůsvitné;
- tvrdé nebo měkké;
- odolné vůči povětrnostním vlivům nebo degradabilní;
- odolné vůči vysoké nebo nízké teplotě [5].

Využití polymerů:

- plasty;
 - obalová technika;
 - stavebnictví;
 - strojírenství;
 - elektrotechnika;
 - elektronika;
 - nábytkářství;
- nátěrové hmoty;
- lepidla a tmely;
- přírodní či chemická vlákna;
- kaučuky [5].

1.3.1.1 Dělení polymerů a zařazení polykarbonátu

Polykarbonát patří mezi syntetické polymery s amorfni nadmolekulární strukturou a s ohledem na tvar jeho molekul přísluší skupině lineárních polyesterů. Na obrázku 1.1 je znázorněno dělení polymerů dle nejběžnějších náhledů, přičemž tmavou barvou je vždy znázorněna skupina, již polykarbonát přísluší. Vlastnosti polykarbonátu tak lze často odvodit právě v návaznosti na zařazení do těchto skupin v rámci znázorněného rozdělení polymerů. Vyobrazené skupiny jsou podrobněji popsány v následujících odstavcích [6,3,7,8,9].



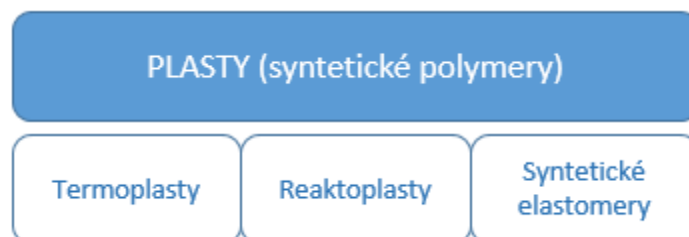
Obr. 1.1 Schéma znázorňující dělení polymerů [3,6,7]

Dělení polymerů dle původu

Dle původu se polymery dělí na polymery přírodní nebo syntetické polymery, které jsou získávány uměle řízenou výrobou. Polykarbonát patří právě mezi polymery syntetické, což je v tomto případě určující pro další náhledy na možnosti rozdělení.

Dělení syntetických polymerů dle teplotního chování

V oblasti automobilového průmyslu a technického využití polymerů jsou nejzásadnější skupinou syntetické polymery neboli plasty. Ty se podle jejich chování za zvýšené teploty dělí na reaktoplasty, syntetické elastomery a právě termoplasty, mezi něž patří i polykarbonát. Toto dělení je znázorněno ve schématu na obrázku 1.2 [1,6].

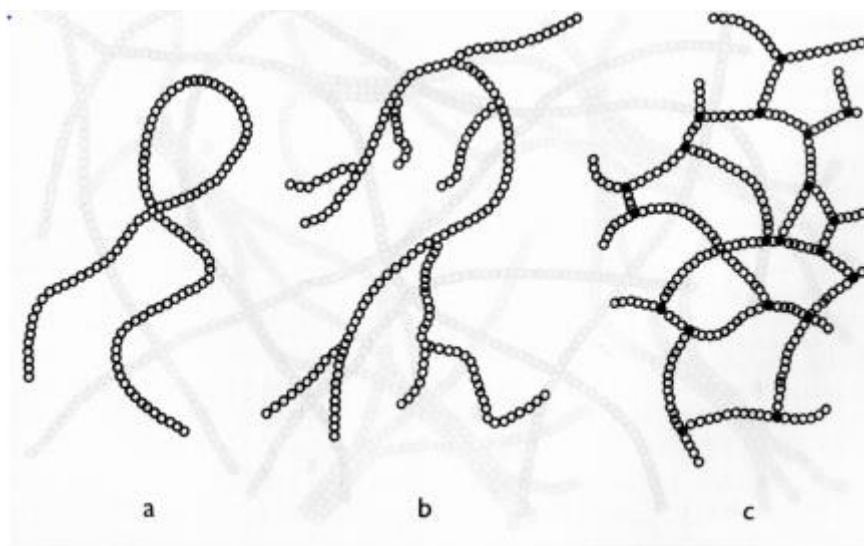


Obr. 1.2 Schéma znázorňující dělení syntetických polymerů dle teplotního chování [6]

Termoplasty jsou polymerní materiály, které při zahřívání měknou, přechází do plastického stavu a lze je tvářet. Do oblasti taveniny přechází zahřátím nad teplotu tání. Zpětným ochlazením pod tuto teplotu přechází opět do tuhého stavu. Při zahřívání neprobíhá chemická reakce a během zpracování se nemění jejich chemická struktura. Změny, kterými materiál prochází, mají pouze fyzikální charakter a proces měknutí a tuhnutí je vratný (lze jej teoreticky opakovat do nekonečna) [6,7].

Dělení dle tvaru molekul

Dle tvaru molekul se polykarbonát řadí mezi lineární polymery, varianta a) na obrázku 1.3. Lineární polymery se vytvářejí spojováním monomerních jednotek se dvěma funkčními skupinami. V důsledku svého tvaru molekul se vyznačují dobrou tekutostí taveniny, vyšší teplotní odolností, vyšší hustotou materiálu a vyšší pevností, než je tomu u rozvětvených polymerů. V případě vícefunkčních monomerů vznikají rozvětvené nebo síťované makromolekuly jak je znázorněno na obrázku 1.3 ve variantách b), c) [14].



Obr. 1.3 Tvary polymerních řetězců [40]

Dělení dle nadmolekulární struktury

Dle nadmolekulární struktury nebo také uspořádanosti molekul, se polykarbonát řadí mezi amorfní polymery. Amorfní polymery jsou látky, které nemají v pevném skupenství pravidelnou strukturu a uspořádání jejich částic je náhodné. Amorfní látky jsou považovány za izotropní a mezi typické znaky amorfních termoplastů patří možnost jejich transparentní podoby. Vyznačují se relativně nízkým smrštěním proti formě (do 1 %), což ještě podtrhuje jejich výhodnost pro použití při výrobě rozměrově přesných součástí. Z technologického i aplikačního hlediska je pro ně dominantní teplota skelného přechodu, která se značí T_g , bývá také nazývána jako bod zvratu 2. řádu. Tato teplota je limitní teplotou pro vyjímání výstřiku z formy a také je hraniční teplotou pro použití výrobků [6,7,29].

1.3.2 Polykarbonát

Polykarbonát je přirozeně průhledný materiál s výbornou světelnou prostupností. Tato základní vlastnost, spolu s dobrou mechanickou odolností, ho předurčují k využívání v oblastech průmyslu, kde ze své podstaty nahrazuje sklo. S polykarbonátem, jakožto surovým materiálem se dnes již běžně setkáváme v nejrůznějších barevných variacích, získávaných dobarvováním, což ještě rozšiřuje pole jeho využitelnosti [6,7].

V praxi se polykarbonáty distribují pod komerčním označením Makrolon nebo Lexan.

Výhody PC:

- vysoká rázová houževnatost i za velmi nízkých teplot;
- odolnost proti UV-záření;
- značná stálost proti oxidaci až do 120°C;
- dobrá odolnost proti hydrolýze;
- dobrá rozměrová stabilita až do 140 °C;
- dobré elektroizolační vlastnosti a vysoká mechanická pevnost;
- nízká absorpce vody [11].

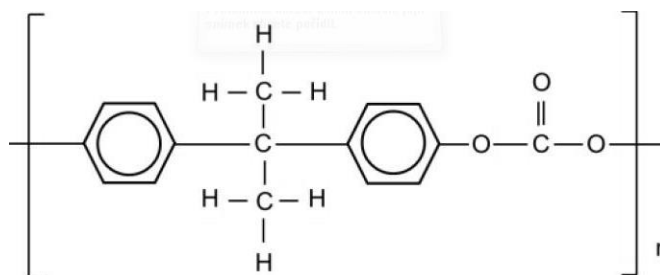
Nevýhody PC:

- nedostatečná odolnost proti dlouhodobějšímu působení vařící vody, páry, amoniaku a amidů
- degradaci také způsobuje dlouhodobé působení metanolu [11].

Využití:

- domácí i laboratorní nádobí;
- elektronické přístroje;
- displeje;
- optické čočky;
- ochranná skla [11]

Název polykarbonát je odvozený od funkčních karbonátových (uhličitanových) skupin (-O-(C=O)-O-), které v jejich řetězci spojují monomerní jednotky.



Obr. 1.3 Chemický strukturní vzorec polykarbonátu [36]

1.3.3 Zpracování polykarbonátu vstřikováním

Polykarbonát, jak již bylo definováno, patří mezi termoplasty a lze jej tedy přetvářet po roztavení. Nejčastěji využívanými technologiemi jsou vytlačování nebo lití, v dnešní době je však nejběžnější technologie vstřikování plastických hmot.

Technologie vstřikování je nejrozšířenějším způsobem zpracování nejen plastů, ale i pryží a kaučuků. Je využívána pro výrobu polotovarů, dílů určených pro další zkompletování, ale i konečných výrobků, které se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností. Jde o diskontinuální, cyklický proces, jímž je možno získat i tvarově velmi složitý díl s výbornou kvalitou povrchu, za jeden krátký výrobní cyklus. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady na nákup strojů a forem, což předurčuje tuto technologii pro velkosériovou či hromadnou výrobu [14,15].

1.3.3.1 Popis vstřikovacího cyklu

Před zahájením vstřikovacího cyklu je forma otevřená a její dutina prázdná. Cyklus započne přisunem pohyblivé části formy k pevné, forma se zavře a uzamkne. Přisouvací síla F_p , která je v porovnání se silou uzavírací výrazně menší, slouží pouze k ustavení pohyblivé části formy do pracovní pozice. V tomto okamžiku se začíná měřit uzavírací síla F_u , která svým působením zaručuje, že se forma pod vlivem tlaku taveniny v průběhu vstřikování neotevře [14,15,16].

Pohyb šneku v tavicí komoře je nejprve rotační, kdy za kontinuálního promíchávání dochází k roztavení surového materiálu. V průběhu samotného vstřikování šnek vykonává pouze axiální pohyb bez rotace a plní tak funkci pístu. Po naplnění formy dojde ještě ke stlačení za účelem dosažení maximální hodnoty tlaku [14,15,16].

Chlazení taveniny začíná již s jejím prvním kontaktem s povrchem dutiny formy a končí až okamžikem otevření formy a vyjmutím výstřiku. Doba chlazení závisí na tloušťce stěny výrobku a na teplotě, na níž je forma předeřhřáta T_f . Dobu chlazení dělíme na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a na dobu chlazení při klesajícím tlaku. Chladnutí má velký vliv na výslednou kvalitu výrobku. Tavenina se během něj smršťuje a zmenšuje svůj objem, což má za následek tvorbu propadlin a staženin. Proti tomuto procesu lze bojovat dotlakem, tedy dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy [14,15,16].

Dotlak dělíme na izobarický v případě, že po celou dobu působení je roven maximálnímu tlaku a izochorický, pokud se po několika sekundách tlak sníží a chladnutí tak pokračuje za rozdílného tlaku, ale již nekompensovaného objemu taveniny. Pro realizaci dotlaku je nutné udržet před čelem šneku určitý objem plastu, nazývaný jako polštář [14,15,16].

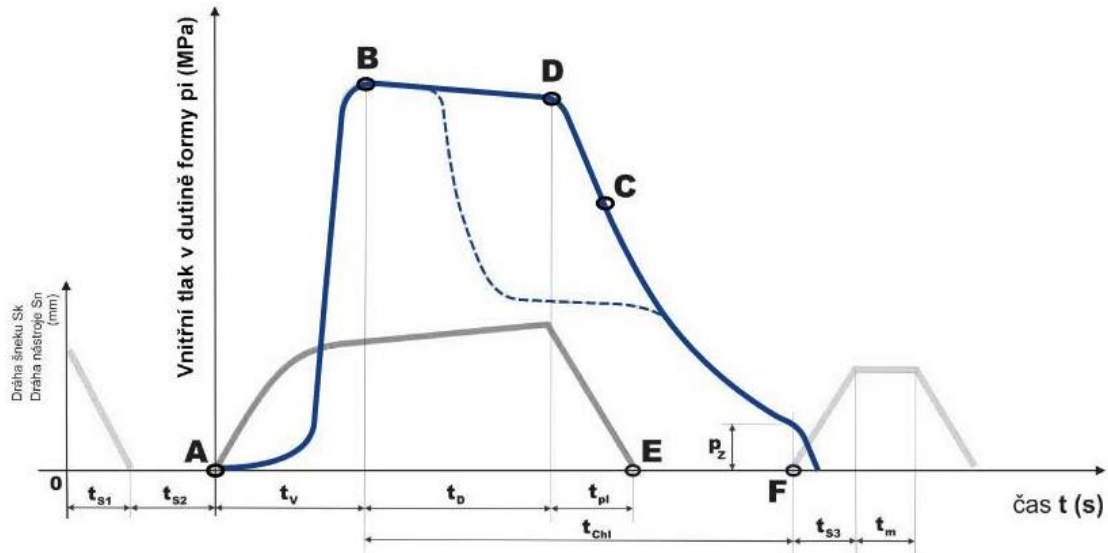
Po dotlaku následuje plastifikace další dávky plastu. Šnek za svého rotačního pohybu nabírá granulovanou hmotu, taví ji a tlačí do prostoru před čelo. Za tohoto pohybu současně ustupuje dozadu a překonává protitlak. Velikost protitlaku ovlivňuje dobu plastifikace a při tom i kvalitu prohnětení roztaveného plastu. Příliš vysoký protitlak může způsobit degradaci plastu. K ohřevu plastu dochází převodem tepla od stěn válce, frikčním teplem, které vzniká třením plastu o stěny komory a o povrch šneku. V případě, že je tavicí komora vybavena samouzavíratelnou tryskou, může plastifikace probíhat při otevřené formě [14,15,16].

Během pokračujícího chlazení tlak ve formě dále klesá až na hodnotu zbytkového tlaku p_z , který odpovídá tlaku těsně před otevřením. Příliš vysoký zbytkový tlak je příčinou vysokých vnitřních pnutí ve výrobcích, které u křehkých materiálů mohou stát za jejich samovolným praskáním. Na konec je výstřik po otevření formy vyhozen a dál chladne ve volném prostředí až do vyrovnání teplot s okolím [14,15,16].

Velmi významný vliv na konečnou kvalitu výrobků, má dokonalé vysušení surového materiálu. Případná vlhkost způsobí v polymeru zmýdelňování, což má za následek pokles molekulové hmoty. Proto se před zpracováním polykarbonátu suší za dosažením maximální vlhkosti 0,03 % [12,13].

Časové fáze vstřikovacího cyklu

Pro popis vstřikovacího cyklu se velmi často využívá tlakového cyklu, který je na obr. 1.4. V tomto případě jsou v něm popsány jednotlivé fáze procesu vstřikování v časové souslednosti, spolu se záznamem vývoje tlaku ve vstřikovací formě a záznamem pohybů vstřikovací formy a šneku vstřikovací jednotky.



Obr. 1.4 Tlakový cyklus popisující proces vstřikování [14]

Kde:

- průběh tlaku v dutině formy - p_i
- průběh pohybu formy
- průběh pohybu šneku

- t_{s1} ... přísun pohyblivé části formy a uzamknutí
- t_{s2} ... čas přísunu vstřikovací jednotky k formě (ne vždy je)
- A ... šnek v tavicí komoře začíná axiální pohyb = začátek vstřikování
- t_v ... doba plnění (vstřikování)
- B ... konec vstřikování (odpovídá nejvyššímu tlaku)
- t_{ch} ... doba chlazení
- t_d ... doba dotlaku
- D ... konec dotlaku
- C ... okamžik zatuhnutí hmoty ve vtokovém kanálu
- t_{pl} ... doba plastifikace nové dávky plastu
- E ... konec plastifikace nové dávky
- F ... otevření vstřikovací formy

1.3.3.2 Faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku

O kvalitě výsledného výstřiku a také o jeho fyzikálních a mechanických vlastnostech rozhoduje hned několik parametrů, které lze ovšem přímo ovlivnit. Tyto parametry vždy působí současně a navzájem se ovlivňují [17].

Materiál a jeho vlastnosti:

Zpracovávaný materiál může mít různé vlastnosti, při jeho volbě by se proto mělo zohledňovat následující:

- rychlost plastifikace, která je žádoucí co nejnižší;
- tekutost polymeru, která by se neměla příliš rychle měnit s měnící se teplotou;
- co nejširší pole tepelné stability plastu v rozsahu jeho zpracovatelských teplot;
- tendence materiálu ke smršťování [14,15,16].

Vstřikovací rychlost v_{vst}

Vstřikovací rychlostí je ovlivňována rychlost postupu čela taveniny a tím i doba plnění. Zvyšující se rychlost má za následek zvyšování vnitřního tlaku a je jí dosahováno i vyššího smykového namáhání, což zvyšuje teplotu taveniny. Vyšší teplota taveniny stojí za nižší viskozitou a díky tomu je dosahováno lepšího zatékání taveniny. Jsou tak eliminovány takzvané nedostřiky, kdy tavenina nezaplní dokonale celou dutinu vstřikovací formy. Zvýšení teploty ale současně prodlužuje dobu chlazení [14,16,17].

Vstřikovací tlak p_v

Nastavením vstřikovacího tlaku je ovlivňována velikost tlaku v dutině formy a čas plnění. Jeho zvyšováním se dosahuje stejných ovlivnění jako v případě zvyšování rychlosti. Vstřikovací tlak ovlivňuje výslednou kvalitu výrobku, a velikost vnitřního pnutí [14,16,17].

Teplota taveniny T_t

Teplotou taveniny je ovlivňována její likvidita a v návaznosti na to i délka vstřikovacího cyklu. Se zvyšováním teploty se její tekutost zvětšuje, což vede k prodloužení vstřikovacího cyklu. Při zachování v_{vst} totiž klesá minimální potřebná hodnota hydraulického tlaku, ale dochází ke zvýšení tlaku v dutině vstřikovací formy, což může vést ke vzniku přetoků a zástříků. Zvýšení teploty taveniny má za následek prodloužení doby chlazení i dotlaku a stoupá i nebezpečí vzniku spálené hmoty. Naopak s nižší teplotou se zvyšuje nebezpečí vzniku studených spojů [14,16,17].

Teplota formy T_f

Teplotou formy je přímo ovlivňována délka vstřikovacího cyklu, samotná kvalita povrchu, vzhled dílců a jejich rozměrová přesnost. Vyšší teplota ve formě má za důsledek nárůst tlaku v dutině formy, ale především prodloužení doby chlazení. S vyšší teplotou vzrůstá i hodnota smrštění a stoupá tak i nebezpečí vzniku propadlin a staženin. Na druhou stranu dochází ke snížení vnitřního pnutí, protože

relaxační procesy probíhají mnohem rychleji. Vyšší teplota formy napomáhá i eliminaci studených spojů a zvlnění [17].

Velikost dotlaku p_d

Z pohledu problematiky vzniku vnitřního pnutí je právě fáze dotlaku tou nejzásadnější.

Po naplnění tvarové dutiny formy následuje stlačování hmoty, kdy vstřikovací tlak prudce stoupne a vstřikovací rychlost náhle klesne. Pokud by tlak zůstal na původní hodnotě, došlo by ke vzniku tlakové špičky, ke zvětšení hmotnosti a rozměrů výstřiku a k vysokému namáhání formy, které by mohlo vést k pružnému prohnutí formy, tzv. dýchnutí. Aby se zamezilo těmto jevům, je nutné v určité době snížit vstřikovací tlak, tzn. přepnout na dotlak. Je-li přepnutí opožděné, stoupne tlak příliš vysoko a dojde k výše popsaným jevům. Při předčasném přepnutí dochází k opačným jevům a je zde až možnost nedostříknutého výrobku. Doba dotlaku tedy závisí hlavně na průřezu vtokového kanálu a zpravidla činí jednotky až desítky sekund [14,16,17].

Účelem dotlaku je dodávání materiálu do formy a tím tedy kompenzování smrštění během chladnutí, aby nevznikly propadliny a staženiny. V první fázi je dotlak vyšší, aby se využilo vysoké tekutosti taveniny a ke konci se dotlak sníží, aby se omezila orientace polymerních řetězců v okolí vtoku [14,17].

Velikost dotlaku má největší vliv na průběh tlaku uvnitř vstřikovací formy a jeho počátek se vztahuje k momentu přepnutí ze vstřikovací fáze na dotlakovou. Čím vyšší je velikost dotlaku, tím dochází k lepšímu otisknutí povrchu dutiny formy na povrch výrobku. Se zvyšováním dotlaku však může dojít k výskytu velkého zbytkového tlaku, který ve formě zůstane až do otevření, což může mít za následek zvýšení hodnoty vnitřního pnutí ve výrobku. Dalšími jevy, jež doprovází zvýšení dotlaku jsou zvýšení hmotnosti výrobku a prodloužení doby chladnutí, naopak je s ním spojen pokles hodnoty smrštění. Na druhou stranu, nízká hodnota dotlaku má za následek vznik propadlin a staženin, případně vede i ke zvýšeným deformacím a nárůstu hodnot smrštění [14,15,16,17].

1.3.3.3 Zařízení pro vstřikování

Pro realizaci výroby plastových dílců vstřikováním je nutností celá řada vybavení. Mezi nejzákladnější patří vstřikovací stroj a vstřikovací forma. Ostatní příslušenství jako sušičky granulátu, potrubní dopravníky granulátu, robotické manipulátory, pásové dopravníky pro hotové výrobky či temperační pece pro snížení vnitřního pnutí podporují proces vstřikování nebo zajišťují přípravná zpracování granulátu či následná zpracování výrobků [14,17].

Dělení vstřikovacích lisů

Vstřikovací stroje lze dělit dle mnoha hledisek, jejichž stručný výčet je v tabulce 1.1. Z pohledu samotné technologie vstřikování jsou však dnes nejvíce rozšířeny šnekové vstřikovací stroje.

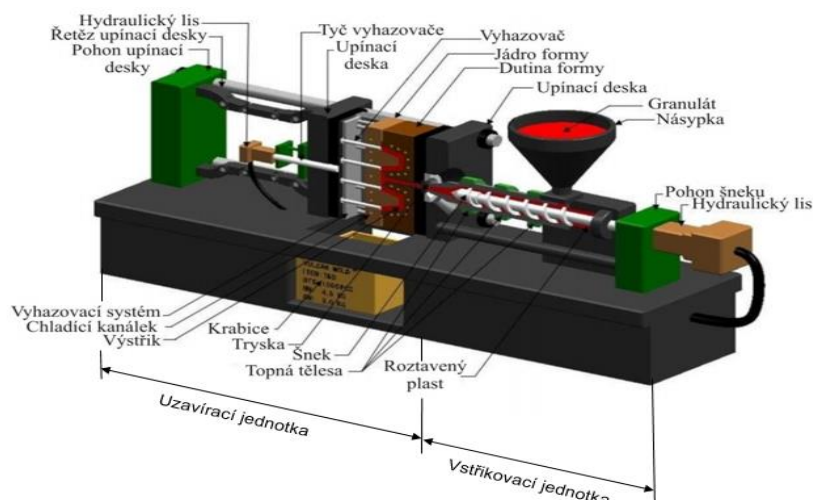
Tab. 1.1 Dělení vstřikovacích lisů.

Kritérium	Druhy
Dle druhu pohonu pro pohyb v hlavních osách.	Hydraulické, elektrické, hybridní.
Dle pracovního členu v tavicí komoře.	Šnekové, pístové.
Dle směru posuvu pohyblivé desky uzavírací jednotky	Horizontální, vertikální.
Dle počtu desek uzavírací jednotky.	Dvoudeskové, třídесkové.
Dle počtu šneků.	Jednošnekové, vícešnekové.
Dle rychlosti otáček.	Rychloběžné, pomaloběžné.
Dle počtu vodicích tyčí uzavírací jednotky.	Bez vodicích tyčí = bezsloupkové, se dvěma tyčemi, se čtyřmi tyčemi.
Dle max. uzavírací síly.	Malé do 50 tun; střední do 500 tun; velké nad 500 tun.

Šnekový vstřikovací stroj

Pro šnekové vstřikovací stroje je typickou jejich skladba ze dvou základních částí upevněných na rámu stroje, jak je znázorněno na obr. 1.5.

- vstřikovací jednotka;
- uzavírací jednotka [14,15].



Obr. 1.5 Šnekový vstřikovací stroj [37]

Mezi charakteristické znaky šnekových vstřikovacích strojů patří orientace jejich uzavírací jednotky, kdy její poloha je nejčastěji horizontální, výjimečně vertikální. Teoreticky však může být zcela libovolná [14,15].

Podobně se stroje odlišují i orientací vstřikovací jednotky, která je nejčastěji umístěna také v horizontální poloze nebo vertikální poloze. Existují i případy, kdy je například k plnění využíváno více vstřikovacích jednotek a jsou umístěny např. pod úhlem 45°, nebo je možné polohu vstřikovací jednotky měnit podle potřeby [14,15].

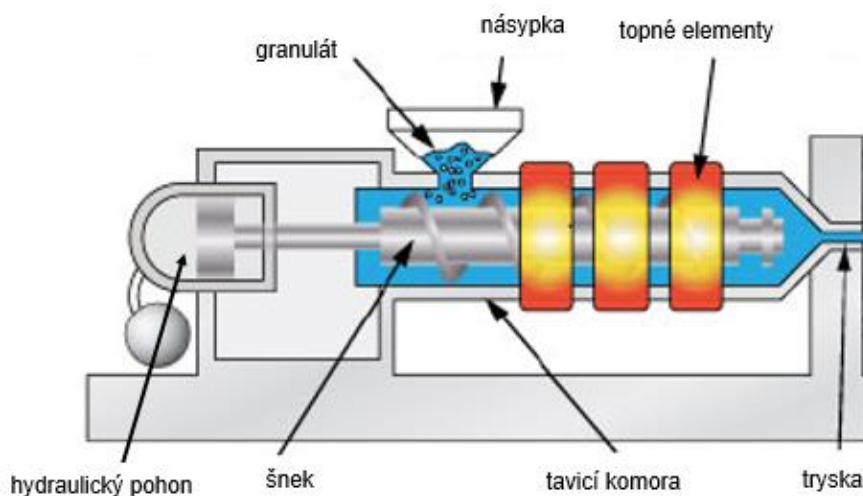
Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka slouží k přeměně granulátu plastu na homogenní taveninu a ke vstřikování této taveniny do dutiny formy [14,15].

Historicky byly rozšířeny především pístové vstřikovací jednotky, které dnes již zcela nahradily vstřikovací jednotky šnekové. Jejich konstrukce umožňuje dosažení dokonale homogenní taveniny [14,15].

Šneková vstřikovací jednotka (viz obr. 1.6) má tyto základní funkční části

- šnek;
- tavicí komora;
- tryska;
- topení [14,15].



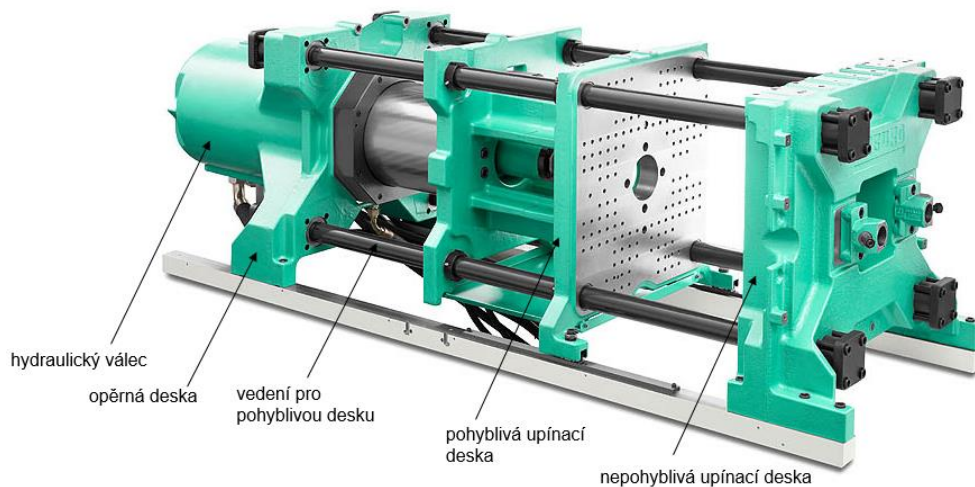
Obr. 1.6 Šneková vstřikovací jednotka [38]

Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka slouží k ustavení nástroje do pracovní polohy. Jejím úkolem je zajistit uzavření formy takovou silou, aby nedošlo k jejímu otevření vlivem působení tlaku při vstřikování taveniny. U Uzavírací jednotky je nastavována přisouvací síla F_p a uzavírací síla F_u [14,15].

Uzavírací jednotka je na obrázku 1.7 a je složena ze základních částí jako:

- opěrné desky pevně spojené s ložem stroje;
- pohyblivé desky pro upnutí pohyblivé části formy;
- upínací desky s otvorem pro trysku pro upnutí nepohyblivé části formy;
- vedení pro pohyblivou desku [14,15].



Obr. 1.7 Hydraulická uzavírací jednotka [39]

Uzavírací jednotky jsou velmi často s pohonem hydraulickým, mechanickým, kombinací obou anebo elektrickým [14,15].

U vstřikovacích strojů se rozlišují vzájemné polohy vstřikovací a uzavírací jednotky. Je možné se tedy setkat s:

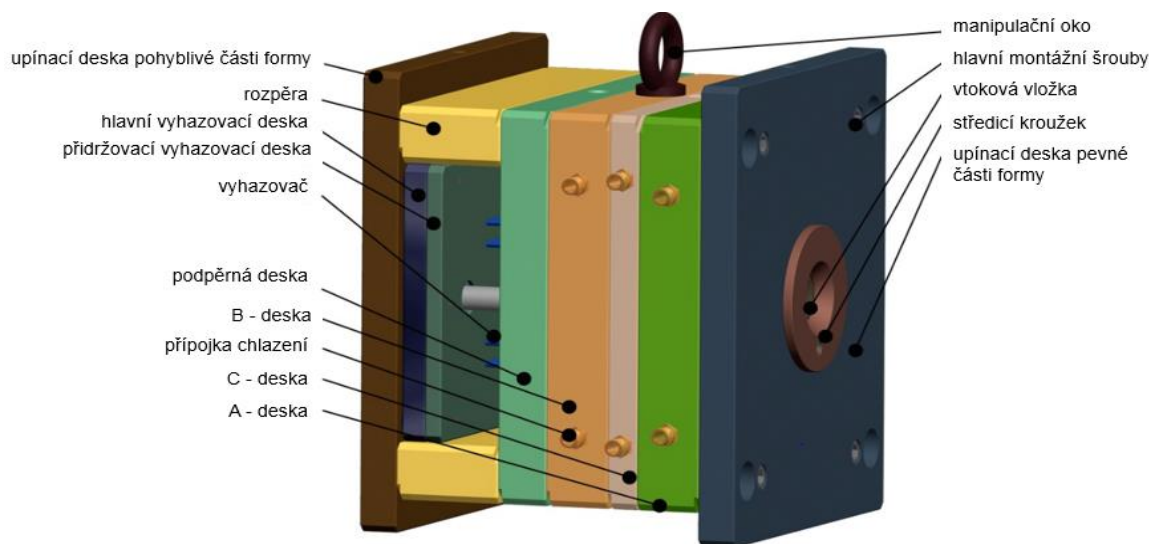
- horizontální polohou obou jednotek, kdy vstřikování probíhá kolmo na dělicí rovinu;
- další možné polohy jsou většinou nastaveny v závislosti na speciálních požadavcích pro daný výrobek a jsou tak spjaté se speciálními technologiemi lisování [14,15].

Vstřikovací forma

Vstřikovací forma je komplexní systém, jehož primární funkcí je doprava taveniny do dutiny formy a její naplnění a při tom odvod tepla přivedeného taveninou. Další základní funkcí je potom odformování neboli vyjmutí dílu [15, 30].

Dle způsobu zaformování je základním typem forma dvoudesková, jejíž popis je na obr. 1.8, můžeme se ale setkat i s formami třídeskovými, s formami s horkým rozvodem či etážovými formami [35].

- podle násobnosti pak rozlišujeme formy jednonásobné a vícenásobné;
- podle způsobu zaformování a konstrukčního řešení rozlišujeme formy dvoudeskové, třídeskové a například etážové;
- podle pozice vstřiku, na formy se vstřikem kolmo k dělicí rovině a se vstřikem do dělicí roviny [15,35].



Obr. 1.8 Dvoudesková vstřikovací forma [30]

1.3.4 Vnitřní pnutí

Vnitřní pnutí je označováno jako skrytá vada výrobku. Popisuje stav silového působení ve výrobku, někdy také nazývaný jako napjatost. Tento stav nemusí být vyvolán jen vnějším mechanickým zatížením, ale velmi často vzniká v průběhu výroby. Jeho výskyt je podmíněn zejména vlivem nerovnoměrných objemových změn ve výstřiku v průběhu jeho výroby, kdy dochází k rozdílným teplotním ztrátám a rozdílným tlakům v různých místech výstřiku [14,17].

Vnitřní pnutí je obrazem nastavených technologických parametrů lisování. Je ovlivňováno teplotami taveniny a formy, průběhem ochlazování, tlakem vstřikování, velikostí dotlaku a dobou jeho působení i rychlostí plnění formy [14,17,19].

Vnitřní pnutí je také definováno v závislosti na termodynamickém stavu výrobku, kdy se v rámci výrobního cyklu zpracováváný materiál v žádném okamžiku nedostává, z termodynamického hlediska, do zcela rovnovážného stavu, vzhledem

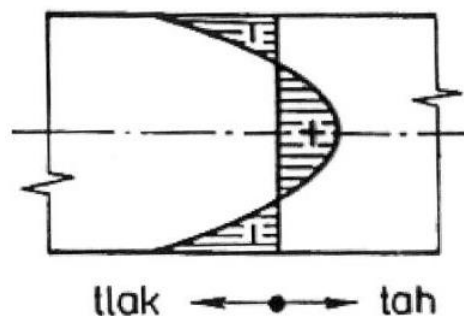
k podmínkám, v nichž se právě nachází. Ideálem by bylo dosažení rovnovážného termodynamického stavu všech řetězců ve výrobku už v okamžiku otevření formy, což by představovalo, že všechny řetězce se nacházejí v rovnovážné konformaci vůči teplotě a samovolně se v čase už nadále nemění. Polymerní řetězce ve výrobku, se však v okamžiku otevření formy zpravidla nacházejí v konformacích různě vzdálených od konečného, rovnovážného stavu. Na těchto řetězcích je pak konstatována napjatost a říkáme, že výrobek má vnitřní pnutí. Řetězce se snaží dospět do rovnovážné konformace, což je děj časově závislý. Jde v podstatě o nalézání rovnovážných poloh, do nichž řetězce přecházejí díky tepelnému pohybu, což si v reálu vyžaduje dobu tím delší, čím je nižší aktuální teplota. Rozložení řetězců s různou napjatostí může být ve výrobku velmi nerovnoměrné, což má při jeho uvolňování, za následek i nerovnoměrné změny rozměrů výrobku. Toto je označováno jako deformace v důsledku uvolňování vnitřního pnutí [14,17].

1.3.4.1 Druhy vnitřního pnutí u výrobků z termoplastů

Druhy vnitřního pnutí u výstřiků z termoplastů jsou popsány v následujících odstavcích. V praxi se mohou všechny příčiny podílet na celkové vnitřní napjatosti hotového výstřiku. Některé z příčin lze eliminovat nastavením technologických parametrů lisování, konstrukcí výstřiků, či volbou materiálu [17].

Tepelné pnutí

Vzniká ve výstřiku v důsledku jeho nerovnoměrného ochlazování. Při chladnutí plastické hmoty ve formě nejprve ztuhnou povrchové vrstvy, které jsou v přímém kontaktu se stěnami formy a vytvoří tak tvrdou krustu, která uzavírá uvnitř ještě tekutý materiál. Následné ochlazování vnitřních vrstev probíhá za odpovídajícího smršťování materiálu, což vyvolává vznik tahového napětí směřujícího do středu stěny výlisku. Na povrchovou vrstvu působí tlakové a na vnitřní vrstvy naopak tahové pnutí, jak je vidět na obr. 1.9 [20].



Obr. 1.9 Znázornění napětí, vyvolaného tepelným pnutím [21]

V závislosti na tom, kdy se začne toto napětí uplatňovat, mohou nastat tři scénáře:

- vznik malých rovnoměrných propadlin – uplatní-li se v době, kdy je skořápka ještě tenká a poddajná;
- vznik hlubokých propadlin – uplatní-li se v momentě, kdy je skořápka již dost silná a dojde k němu v místě pomalejšího chladnutí;
- zbytkové vnitřní pnutí – uplatní-li se v momentě, kdy je skořápka již dostatečně silná a nepropadne se. V tomto případě nedojde k relaxaci vzniklého napětí a to tak zůstává ve výstřiku v podobě vnitřního pnutí [20].

V prvních dvou případech má výlisek viditelný defekt, nicméně je prakticky bez vnitřního pnutí, v případě třetím je na povrchu nepoškozen, ale je zatížen vnitřním pnutím.

Protože základním požadavkem na výrobní proces je výsledná kvalita výstřiku, je ve snaze vyhnout se prvním dvěma scénářům, zvyšován dotlak. Tento parametr je tedy častou příčinou vzniku vnitřního pnutí u amorfních polymerů [20].

Pnutí z přeplněné formy

Toto pnutí vzniká v důsledku stlačení taveniny na vyšší hodnotu, v důsledku uplatnění vyššího tlaku a zejména dotlaku jichž se využívá pro doplnění objemových ztrát vlivem smrštění. Doplnění taveniny do chladnoucího výstřiku je provázáno vznikem vnitřního pnutí, které je úměrné součinu úrovně dotlaku a doby jeho působení. Často vzniká v okolí ústí vtoku [17,21].

Pnutí deformační

Deformační pnutí vzniká v důsledku mechanického namáhání výstřiku při jeho vyhazování z dutiny formy. Tento proces může být znesnadněn nevhodně zvolenými úkosy výstřiku, nebo například malou plochou vyhazovačů [17].

Pnutí z nehomogenní orientace

Pnutí z nehomogenní orientace vzniká vlivem rozdílné orientace makromolekul, případně vláknitých plniv. Při vstřikování roztavených polymerních materiálů, dochází v důsledku značného smykového namáhání k orientaci jejich makromolekul. Makromolekuly jsou pak rychle ochlazeny pod působením velkých stříhových sil, takže za normální teploty mají nestabilní orientační strukturu. Jsou nataženy ve směru toku taveniny. Při zahřátí nad teplotu T_g , při které se tepelný pohyb molekul stává aktivním, může dojít ke zmenšení orientační konfigurace v důsledku změny sklonu molekul. Nastaví se tak stabilní konfigurace molekulárního řetězce, čímž dojde k deformaci výstřiku. Toto pnutí se projevuje zejména u tenkostěnných výstřiků z amorfních termoplastů [17,20,21,31].

Pnutí krystalizační

Krystalizační pnutí vzniká vlivem rozdílné krystalizace po průřezu výstřiku u semikrystalických termoplastů. Protože polykarbonát patří mezi polymery amorfní, tento druh pnutí se ho přímo netýká. Pro úplnost tématu je toto pnutí také, alespoň stručně popsáno. Při kontaktu taveniny se stěnou formy dochází v povrchových vrstvách k rychlému ochlazení a tím pádem k potlačení krystalizace. Naopak ve středových vrstvách, kde tavenina chladne pomaleji, jsou zachovány podmínky pro rozvinutí krystalické struktury. Vznikne tak výrobek s rozdílným obsahem krystalického podílu po průřezu. Projeví se skin-core efekt, který vyvolává vnitřní napětí. Tomu přispívají i objemové změny v důsledku rozdílné hustoty rychle ochlazených povrchových oblastí a vnitřních částí výstřiku s plně rozvinutou krystalickou strukturou [17,21].

1.3.4.2 Projevy vnitřního pnutí

Z pohledu výsledné kvality vystřikovaných dílů, je zbytkové vnitřní pnutí vnímáno jako jev velmi nebezpečný a řadíme ho mezi skryté vady [21].

Zbytkové vnitřní pnutí, svou přítomností, může po vyhození výstřiku způsobovat tvarové deformace výrobků a může stát i za jejich destrukcí, k níž může dojít i za

mnohem nižších napětí, než je mezní stav pevnosti použitého materiálu. Působením vnitřního pnutí dochází k vyrovnávání tuhosti výlisků a silových účinků, což má za následek:

- u výlisků s menší tuhostí a výrazným vnitřním pnutím dojde k rozměrovým a tvarovým změnám ihned po vyjmutí z formy. Často dochází k prohnutí stěn, či zkroucení do vrtule.
- v opačném případě, kdy je tuhost výstřiků vysoká, dochází k deformačním změnám až po odstranění vnitřního pnutí během žíhání, které se u amorfních plastů provádí pod teplotou T_g [19,21].

Zbytkové vnitřní pnutí má nezanedbatelný vliv na mechanické vlastnosti materiálu. A nejsou výjimkou případy, kdy k destrukci výrobků dochází zcela samovolně. Období po vylisování, během něž zpravidla dochází k projevům vnitřního pnutí, se nazývá období dozrávání výlisku, kdy v jeho struktuře dochází k relaxaci vnitřního pnutí [19,21].

1.3.4.3 Eliminace vnitřního pnutí ve výrobcích

Eliminace vnitřního pnutí konstrukcí výrobku

Vhodně zvoleným konstrukčním zpracováním výstřiku se dá předcházet vzniku vnitřního pnutí ve výstřicích. Při konstrukci dílce by měl být brán ohled na tento fakt a konstruktér by navrhnout dílec s:

- co nejmenšími rozdíly v tloušťce stěn;
- co nejmenší tloušťkou stěn;
- rádií místo ostrých hran a rohů;
- co nejmenším počtem jader a tvarových částí formy, které mají obvykle rozdílnou teplotu od temperované formy;
- vhodným rozmístěním žebířů a volbou jejich tvaru a poměru tloušťky se stěnou dílu;

Eliminace vnitřního pnutí nastavením vstřikovacích parametrů

Ke vzniku vnitřního pnutí ve výstřicích do jisté míry přispívají technologické parametry, jejichž hodnoty lze na vstřikovacím stroji ovládat. Nejzásadnější vliv na vnitřní pnutí mají:

- velikost a doba dotlaku;
- teplota formy a s ní spojená doba chlazení [19,21].

Pro dosažení co nejmenších hodnot vnitřního pnutí je třeba volit co nejvyšší teplotu formy a dlouhou dobu chlazení, spolu s co nejnižším dotlakem a nejkratší dobou dotlaku.

Požadavky na snížení vnitřního pnutí pomocí nastavení parametrů vstřikování, jdou proti požadavkům na výslednou kvalitu výrobků. Kdy například dotlak je třeba nastavit na takové hodnoty, aby nedocházelo k výraznému smrštění, vzniku propadlin, či vakuol (lunkrů) [21].

Eliminace vnitřního pnutí následným zpracováním - temperováním

Velmi často se nedaří nastavením technologický parametrů lisování, či konstrukcí výstřiku, eliminovat nežádoucí vnitřní pnutí. Kvůli optimalizacím procesů, které vedou zpravidla ke zkracování výrobních časů, se dostávají do kolize dva základní požadavky na výrobu. Požadavky výrobce, které jsou dosáhnout co nejkratší výrobní časy, se neslučují s dobrou výslednou kvalitou výlisku. Během krátkého lisovacího cyklu je velice obtížné minimalizovat vnitřní pnutí v plastu, protože odpadá možnost pozvolného, rovnoměrného chlazení výstřiku přímo ve formě. Právě za tímto účelem se po ukončení procesu lisování přistupuje k metodám následného odstranění vnitřního pnutí temperací, mezi něž patří technologie rozepsané v následujících odstavcích [19,21].

Přelisování

Jde o následnou tepelnou úpravu, během níž je výrobek zahřát nad teplotu T_g nebo T_m . Toto zahřátí je spojeno s uvolněním i zbytkového vnitřního pnutí vzniklého vlivem nerovnoměrné orientace, je však provázáno výraznou deformací výstřiku. Z tohoto důvodu je nutností temperovat výstřiky ve formách o stejném tvaru, jako je požadovaný stav. Takové přelisování může trvat i několik desítek hodin. Při dlouhodobém zahřátí nad hranici T_g , T_m , je třeba brát v potaz hrozící nebezpečí degradace materiálu [19,21].

Temperace pro snížení vnitřního pnutí v žíhací peci

Tento způsob následného zpracování je považován pouze za řízené dozrání výrobku. Ty jsou v peci volně loženy a jejich zahřátí nikdy nepřesahuje teplotu T_g respektive T_m . Dochází tak k odstranění pouze tepelného vnitřního pnutí, které má ovšem ve výstřicích z amorfních polymerů jako je polykarbonát, nejzásadnější vliv [19,21].

Temparační pece lze dělit na uzavíratelné, průběžné nebo stacionární. Dle způsobu výhřevu se pak rozlišují pece horkovzdušné a pece s infrazářiči [19].

1.3.4.4 Metody pro stanovení vnitřního pnutí

Stanovení velikosti vnitřního pnutí je, poměrně obtížná záležitost. Existuje několik metod, díky nimž je různými způsoby detekovatelná přítomnost vnitřního pnutí ve výrobku. Určení jeho velikosti je pak zpravidla postaveno na posouzení jeho vyobrazení či odezev, jež svou přítomností vyvolává. To může být subjektivním vnímáním ovlivnitelný proces.

Fotoelasticimetrie

Tato metoda je založena na vyhodnocování obrazců vzniklých průchodem polarizovaného světla skrz čirý materiál. Při vyhodnocování využíváme toho, že světlo mění své atributy, což znamená, že mění velikost a orientaci vlnové délky, při průchodu přes oblasti s vnitřním pnutím. Důvodem tohoto efektu je takzvaný silový dvojlom. Vložíme-li tedy materiál s pnutím před zdroj polarizovaného světla a budeme ho pozorovat přes polarizační filtr, uvidíme v něm světlé a tmavé zóny, a dokonce i duhové efekty jasně lokalizující místa s největším pnutím.

Rentgenografie

Pomocí rentgenografie lze znázornit samotné vnitřní pnutí. Při vyhodnocování se využívá poznatku, že vnitřní pnutí deformuje krystalickou mřížku plastu. Tato metoda je náročná na zařízení a velice pracná. Pomocí známých modulů pružnosti krystalické mřížky lze kvantitativně určit vnitřní pnutí u plastu. Lze měřit jak v odrazu, tak v průchodu.

Testy v tenzoaktivním prostředí

Tato metoda využívá koroze pod napětím. Koroze pod napětím se projeví, pokud jsou plasty vystaveny mechanickému namáhání za současného působení některých kapalin nebo par. Jejich působením se na povrchu součásti vytvářejí trhliny, které se šíří, prohlubují a prudce zhoršují mechanické vlastnosti plastu. Namáhání, jemuž je vzorek vystaven, je buď mechanické, tepelné, nebo se projeví vnitřní pnutí materiálu, které lze takto kvalitativně měřit. Expoziční doba je několik sekund až několik dnů. Těleso se vloží na tuto dobu do tenzoaktivního prostředí, pak se vysuší a vyhodnotí stupeň rozpraskání (vizuálně, rozptylem nebo absorpcí světla). Při vysvětlování mechanismu koroze za působení napětí se vychází z následujících představ:

- v materiálu jsou přirozené neviditelné nebo viditelné strukturní vady;
- při deformaci se v místě těchto defektu koncentruje napětí;
- napětí na defektních místech může dosáhnout hodnot postačujících k roztržení kovalentní vazby. Přitom defekty rostou do viditelných rozměrů a dochází k přerušení celistvosti zkušebního tělesa;
- při velkých napětích se obvykle tvoří jedna trhlina, při malých napětích vzniká větší množství trhlín. Tento jev je zvláště charakteristický pro tvrdé polymery. Tvorba většího množství trhlín při působení malých napětí je ovlivněna těmito faktory:
 - soustředění napětí v oblasti kolem trhliny způsobuje, že při malých napětích rostou trhliny rychleji než při velkých napětích
 - relaxace napětí v oblasti obklopující trhlinu je menší.

1.3.5 Sdílení tepla

Sdílení tepla je termodynamický děj, který tvoří podstatu pro možnost využití temperačních pecí pro snížení vnitřního pnutí ve výstřicích. Dochází při něm k tepelné výměně mezi dvěma tělesy o různé teplotě. Průběh, je vždy takový, že teplejší těleso předává část své vnitřní energie tělesu chladnějšímu [22,23].

V temperační peci horký vzduch předává teplo chladnějším výliskům, za účelem zvýšení jejich teploty k teplotě T_m pro vyrelaxování výrobků v podmínkách, za nichž nedojde k zásadní deformaci.

U sdílení tepla se rozlišují tři základní způsoby:

- sdílení tepla prouděním (konvekce) – je to typický způsob šíření tepla v tekutinách, které konají makroskopický pohyb, proudí. Za svého pohybu přijímají teplo od tepelných zdrojů a unášejí je sebou jako tepelné formy energie. Tohoto principu se využívá u horkovzdušných žíhacích pecí;

- sdílení tepla sáláním (radiace) – k sálání tepla dochází vyzařováním elektromagnetických vln, které je přímým důsledkem pohybů atomů a molekul v hmotě. Teplota tělesa ovlivňuje vlnovou délku a kmitočet vyzařovaných vln. Za běžných pokojových teplot vyzařují tělesa v oblasti infračerveného vlnění. Tohoto jevu je využíváno u infrazářivých žehacích pecí;
- sdílení tepla vedením (kondukce) – je to typický způsob šíření tepla v pevných látkách, které probíhá výměnou energie mikroskopickým pohybem molekul hmoty [23,24].

V případě horkovzdušné temperační pece, která je v našem případě využita, je zásadní sdílení tepla prouděním.

1.3.6 DOE

Design of experiment, nebo také plánovaný experiment, je návrh strategického přístupu, například k optimalizování procesu pomocí statistických experimentů. Je vhodným nástrojem v případech, kdy do zkoumaného procesu vstupuje větší počet ovlivňujících faktorů. Pomáhá určit vzájemné vztahy mezi těmito faktory a vliv jejich působení [25,26,34].

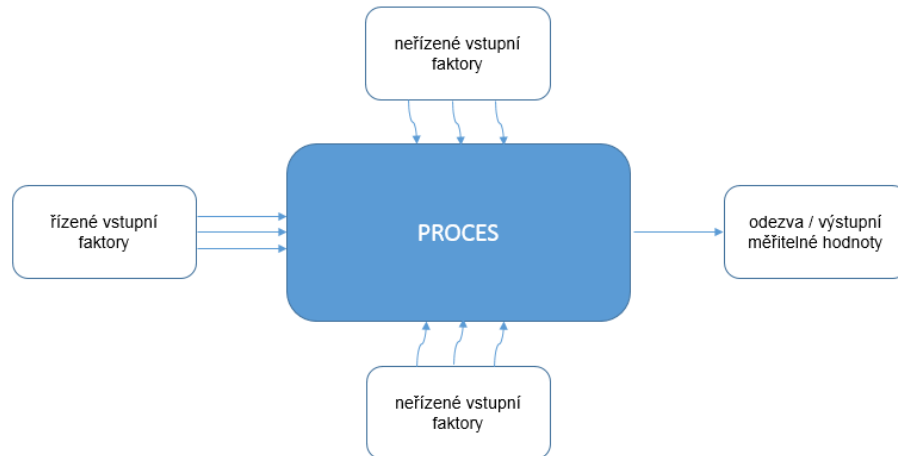
Ve své podstatě jde o nástroj, který umožní najít rychlým způsobem odpovědi na otázky, jež nelze odpovědět s využitím výpočtů. Správně provedený experiment by měl dát odpovědi na otázky jako:

- Jaké jsou klíčové faktory ovlivňující proces?
- Při jakém nastavení procesu dosahujeme přijatelných výsledků?
- Jaké jsou následky působení klíčových faktorů a jejich vzájemných kombinací?
- Jaké nastavení procesu přináší nejmenší rozdílnost výsledků [25]?

Plánovaný experiment je zkouška, či posloupnost zkoušek, ve kterých se cílevědomě mění vstupní faktory procesu tak, aby bylo možné zkoumat a identifikovat odpovídající změny výstupní proměnné. Obecným cílem experimentů často bývá zkoumání procesu, ale může jím být i potvrzení předem stanovených teoretických předpokladů [34].

1.3.6.1 Důležité termíny pro DoE:

Pro jednodušší orientaci v experimentu samotném může pomoci definování základních pojmů, jež jsou v rámci DoE často používány. Na obr. 1.10 je znázorněno základní schéma popisující princip experimentu. V následujících odstavcích jsou definovány i ostatní pojmy.



Obr. 1.10 Schéma principu DoE [26].

Řízené vstupní faktory

Řízené vstupní faktory jsou kontrolovatelné faktory, jejichž ideální hodnota nastavení je předmětem zkoumání. Tyto faktory mohou přímo ovlivňovat výstupní proměnnou a každý z nich má alespoň dvě kvantitativní, či kvalitativní hodnoty, tedy úrovně [26].

Interakce

Jako interakce se nazývá fakt, že vliv jednoho faktoru na odezvu může záviset i na úrovni jiných faktorů [26].

Neřízené vstupní faktory

Neřízené vstupní faktory, jsou nekontrolovatelné náhodné vlivy, které při opakování experimentu za stejných podmínek, způsobují kolísání hodnot sledované veličiny, tedy odezvy [26].

Systematické vlivy

Systematické vlivy se mohou projevit ve formě určitého trendu mezi naměřenými hodnotami. Vzhledem k proměnlivosti úrovní zkoumaných faktorů mohou však být obtížně zjistitelné [26].

Odezva

Odezva je měřený nebo pozorovaný výstupní faktor v rámci plánovaného experimentu, závislý na řízených faktorech a náhodných vlivech. Pomocí odezvy se vyjadřuje výsledek plánovaného experimentu [26].

1.3.6.2 Základní principy využívané v DoE

Replikace

Pod tímto pojmem se chápá základní experiment nebo některé jeho části. Experimenty se opakují proto, aby bylo možné určit variabilitu náhodných faktorů

a oddělit ji pak od variability způsobené vlivem střídání zkoumaných faktorů. Replikace umožňuje získat přibližný odhad chyby experimentu a umožňuje také získat podstatně přesnější odhad interakcí mezi různými faktory. Replikace v praxi znamená zopakování všech pokusů experimentu, při zachování kombinace úrovní faktorů [26].

Blokování

Principu blokování se využívá v případech, kdy není možná provést celý experiment za stejných podmínek. Napomáhá při redukování variability způsobené náhodnými vlivy. Jejím hlavním cílem je tedy eliminace nežádoucích zdrojů proměnlivosti [26].

Znáhodnění

Cílem znáhodnění je zabránit směřování vlivu zkoumaného faktoru a systematických vlivů. Zaručuje, že úrovně zkoumaných faktorů se střídají náhodně a že pořadí, v němž je prováděno měření, je také náhodné. Všechny úrovně faktorů tak mají stejnou možnost být ovlivněny systematickými vlivy [26].

1.3.6.3 Pokyny pro návrh experimentu:

Navrhování experimentu je zpravidla týmová práce a pro zdárné navržení a provedení experimentu je nutné, aby všichni členové týmu věděli, co je předmětem zkoumání, jakým způsobem se budou shromažďovat data a jak budou tato data analyzována. Mezi základní pokyny pro vytvoření návrhu experimentu patří:

Formulace a popis problému

V této první fázi dochází k sestavování týmu, který se dále bude podílet na formulaci problému, jež má být řešen. Týmovou práci pak má být i určení základních proměnných experimentu, pro což je jen přínosem větší četnost různých pohledů na problém. Popis problému by měl obsahovat přesné určení cílů, jejichž dosažení přinese skutečný užitek pro společnost. Typicky tak může být cílem zlepšení vlastností produktu nebo vylepšení vývojového, či výrobního procesu [32,33,34].

Identifikace sledované proměnné – odezvy

Vhodná volba závislého, sledovaného faktoru neboli odezvy je naprosto klíčovou pro úspěšné provedení plánovaného experimentu. V praxi může být touto odezvou proměnná, jako například rozměr, či jakost produktu, na druhou stranu jí může být i atribut, jako prospěl/neprospěl, či odpověď ano/ne. S volbou závislé proměnné souvisí i nadefinování způsobu a podmínek jejího měření. Způsobnost měřicího procesu je velice důležitá, neboť při nízké přesnosti měření se nedají odhalit veškeré efekty působících faktorů [32,33,34].

Identifikace faktorů a jejich úrovní

Pro identifikaci vstupních faktorů se využívá praktických zkušeností a teoretických vědomostí, zejména pak znalosti procesu a vědomostí každého člena týmu, jež by měl být odborníkem na vždy na jinou oblast. Důležité je uvědomění si, že každý zvolený faktor zvyšuje náročnost experimentu, na druhou stranu, pokud by byl některý z klíčových faktorů zanedbán a nezahrnut do experimentu, budou jeho výsledky nepřesné a pravděpodobně nepoužitelné pro zlepšení procesu. V této fázi je třeba také rozdělit faktory na kontrolovatelné a nekontrolovatelné, a zamyslet se

nad systematickými vlivy. Na závěr je nutné určit si úroveň každého ze zvolených faktorů [32,33,34].

Volba typu plánovaného experimentu

Volba správného typu experimentu je nejdůležitějším krokem. Jsou – li ovšem správně provedeny 3 předešlé kroky, pak je tato volba relativně jednoduchá. Výběr typu se odvíjí od počtu faktorů, počtu replikací či výběru pořadí jednotlivých měření nebo použití blokování [32,33,34].

Je možno vybírat z následujících typů experimentu:

- jednofaktorové experimenty;
- úplné a neúplné znáhodněné bloky;
- latinské čtverce;
- vícefaktorové experimenty;
- a další [32].

Realizace experimentu

Jak je již dle názvu patrné, tak v této fázi probíhá samotné provedení experimentu. Po celou dobu realizace je nutné monitorovat proces, aby bylo zaručeno dodržení postupů. Případné chyby v realizaci by mohly způsobit neplatnost experimentu. Je doporučováno provést několik zkušebních pokusů, které týmu umožní zkontrolovat systém měření a pomohou určit hrubou představu o experimentální chybě [32,33,34].

Analýza dat

Po provedení experimentu je třeba provést analýzu dat, k čemuž se většinou využívá statistických metod implementovaných do statistických softwarů. Analyzuje se vliv jednotlivých faktorů a jejich vzájemných interakcí. Cílem je vybrat faktory, jež mají statisticky významný vliv na odezvu. V praxi se k tomu často využívá statistických hypotéz jako t-test, f-test, ANOVA a další [32,33,34].

Vyhodnocení závěrů a doporučení

Po ukončení analýzy dat je úkolem experimentátora objasnit praktické závěry plynoucí z experimentu. V praxi je pak dále nutné, aby byly doporučeny postupy další činnosti [32,33,34].

Experimentální chyba

Experimentální chybou je označováno kolísání v odezvách, způsobené vnějšími náhodnými proměnnými, odlišnými od těch faktorů, které zkoumáme pomocí experimentu. Vlivem těchto náhodných proměnných se zvyšuje stupeň nejistoty pozorované hodnoty odezvy dílčího experimentu. V praxi se dá tato chyba stanovit opakováním série experimentů, což je ovšem u průmyslového, nelaboratorního experimentu těžko realizovatelné s ohledem na náklady spojené s každým opakováním.

1.3.7 Realizace experimentů

Samotná realizace experimentu lze rozdělit do pěti základních kroků:

- Příprava experimentu;
- Vlastní návrh experimentu;
- Provedení experimentu;
- Analýza výsledků;
- Aplikace výsledků [33];

2 SEZNÁMENÍ S FIREMNÍM PROSTŘEDÍM

2.1 Proces výroby vnějších čoček automobilových světlometů

Proces výroby dvoukomponentních polykarbonátových vnějších čoček automobilových světlometů znázorňuje schéma na obr. 2.1,



Obr. 2.1 Schéma výroby 2k vnějších čoček světlometu

V následujících odstavcích je znázorněn tok surového materiálu, až do jeho zpracování ve vstřikovacím lise. Pak jsou v reálné souslednosti zachyceny další technologie, které jsou součástí výrobního procesu.

Zásobníky granulátu

Na úplném počátku procesu stojí zásobníky granulátu, potřebného jakožto vstupní materiál. Granulát ze zásobníků (obr. 2.2), umístěných mimo výrobní halu, je přetlakovým potrubním dopravníkem dopravován do zařízení pro vysoušení granulátu.



Obr. 2.2 Zásobníky granulátu

Sušárna granulátu

Sušárny (obr. 2.3) jsou již situovány ve výrobní hale v blízkosti vstřikovacích strojů. Zpravidla tvoří samostatná uskupení a granulát z nich je dopravován do několika vstřikovacích lisů.



Obr. 2.3 Sušárny granulátu

Vstřikovací lis

Po předešlých dvou zařízeních, která slouží k uchování a přípravě materiálu, následuje vstřikovací lis. Z vysoušecích zařízení je dopravován granulát do násypky (viz obr. 2.4), v níž je jeho hladina udržována za pomoci snímačů. Jak bylo popsáno v teoretické části, z násypky následuje zpracování granulátu v tavicí komoře a jeho vstříknutí do dutiny vstřikovací formy. Po ukončení tohoto hlavního výrobního procesu je forma otevřena a výrobek vyjmut manipulačním robotem.



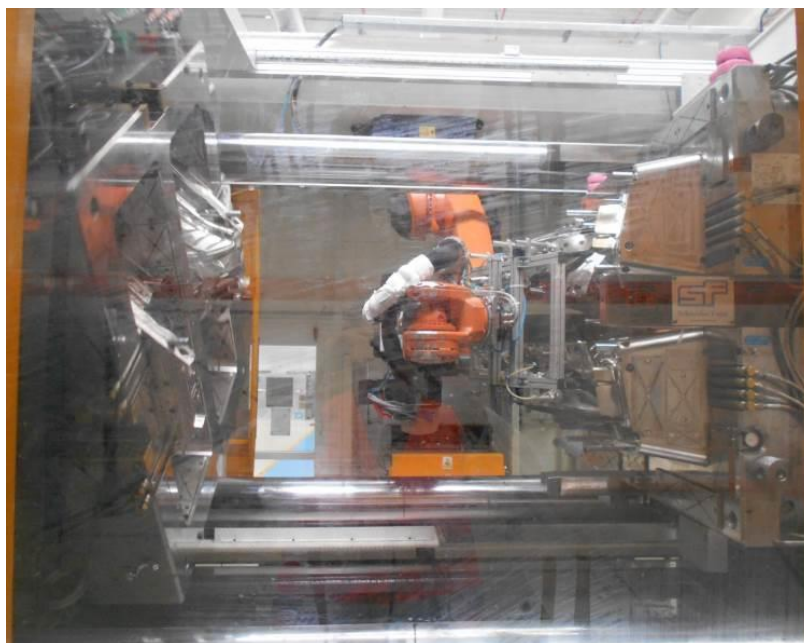
Obr. 2.4 Násypka se vstřikovací jednotkou Lisu



Obr. 2.5 Vstřikovací lis

Manipulační zařízení

Pro manipulaci s právě vyrobenými vnějšími čočkami je využíván manipulační robot (obr. 2.6). Robot je vybaven podtlakovými přísavkami, kterými bezpečně uchopí výstřík a vyjme jej ze vstřikovací formy. Vtoky jsou z výstříku odstraněny za pomoci nůžek, jež jsou na greiferu robota. Poté robot přesouvá výrobek nad plamen plazmy, díky jejímuž působení se zajistí rovnoměrné rozložení náboje na výstříku, což eliminuje přitahování prachových nečistot na jeho povrch. Po tomto ošetření je výrobek odložen robotem na lamelový pásový dopravník, jež ústí do temperačního zařízení pro snižování vnitřního pnutí.



Obr. 2.6 Manipulační robot pro vyjmutí výrobku z vstřikovací formy

Temparační pec pro snížení vnitřního pnutí

Pro ilustraci je na obr. 2.7 vidět výstup z temperační pece. Pec samotná, její účel a princip jsou podrobně popsány v samostatném oddílu 2.3. Z temperačního zařízení je zchlazený výstřik dopraven do zóny před lakovací komorou.



Obr. 2.7 Výstup z temperační pece do kontrolní zóny

Kontrolní zóna před lakovací komorou

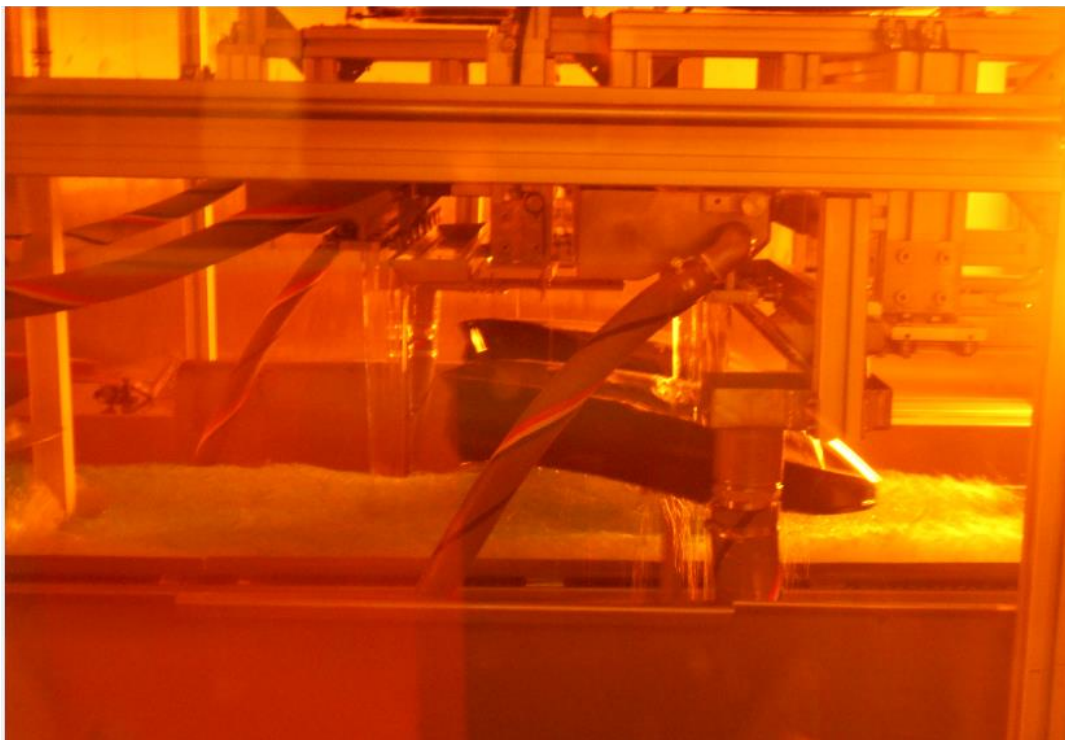
V první kontrolní zóně (obr. 2.8) je výstřik odebrán z lamelového dopravníku od temperační pece kvalifikovaným pracovníkem. Ten zároveň provádí první kontrolu viditelných vad, jež mohly vzniknout při výrobě. Nejsou-li na výstřiku nalezeny vizuální defekty, je výrobek umístěn na trn dopravníku na protější straně místnosti. Tento dopravník provede výrobek zbytkem výrobního procesu.



Obr. 2.8 Kontrolní zóna před lakovací komorou

Lakovací a okapová zóna

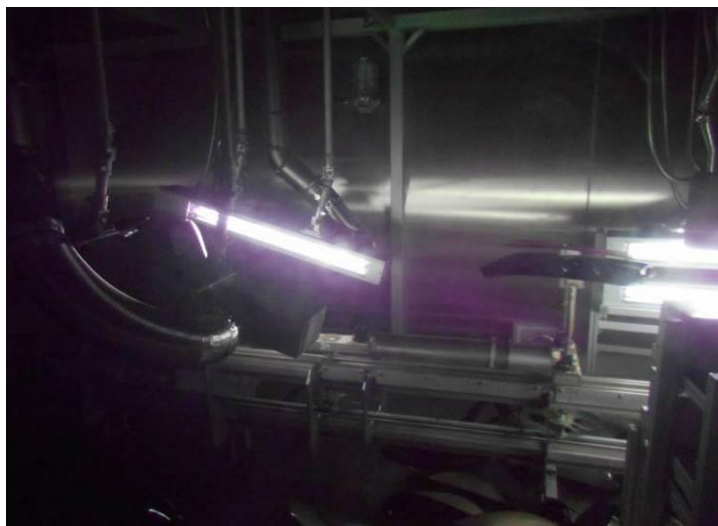
Před vstupem výrobku do lakovací komory je, každý z trnů dopravníku snímán, jestli je obsazen výrobkem. Dle toho je pak ovládána lakovací hlava, která prázdné pozice na dopravníku nezpracovává. Do lakovací komory vstupuje výrobek přes tzv. vzdušný zámek, který za využití přetlaku a přesně definovaného proudění vzduchu zabezpečuje bezprašné prostředí v této komoře. Výstřík se v lakovací komoře dostává pod lakovací hlavu (obr 2.9), z jejíž štěrbin vytéká souvislá clona laku a polévá vnější stranu výstříku. Pro nanesení požadované vrstvy laku musí být přesně nadefinován sklon trnu, na němž je výstřík přepravován. Těsně před aplikací se kontroluje hustota i teplota laku, které mohou negativně ovlivnit výslednou kvalitu povrchu výrobku. Po projetí clonou, se výstřík v lakovací komoře dostává do okapové zóny, kde přebytečný lak z výrobku volně ztéká do nerezových van pod dopravníkem. Tento lak se pak vrací do míchací části lakovacího zařízení, kde je mísen s novým lakem a rozpouštědlem v požadovaném poměru. Po následné filtraci je tedy znovu použit. Tloušťka nanesené vrstvy laku by měla být kolem 10 μ m, každý zákazník má ovšem spodní hranici definovanou jinak. Po okapání přebytečného laku se výstřík, stále na trnovém dopravníku, dostává do odpařovací a vytvrzovací komory.



Obr. 2.9 Lakovací hlava

Odpařovací a vytvrzovací komora

V této části linky musí dojít k zajištění dostatečné doby pro působení rozpouštědla obsaženého v laku a poté k jeho odpaření. Doba pro odpařování je pevně stanovena a dráha dopravníku v této části proto musí být tak dlouhá, aby výstřik strávil v tomto prostředí požadovanou dobu. Po odpaření rozpouštědla pokračuje výstřik do vytvrzovací komory, kde je výrobek s akrylátovým lakem na svém povrchu podroben působení UV záření. Za přispění UV dojde v laku k chemické reakci zvané fotoiniciovaná polymerace, díky níž se z dosud měkkého laku stává tvrdá vrstva, která bude výrobek nadále chránit.



Obr. 2.10 Vytvrzovací komora s UV zářiči

Kontrolní a balicí zóna

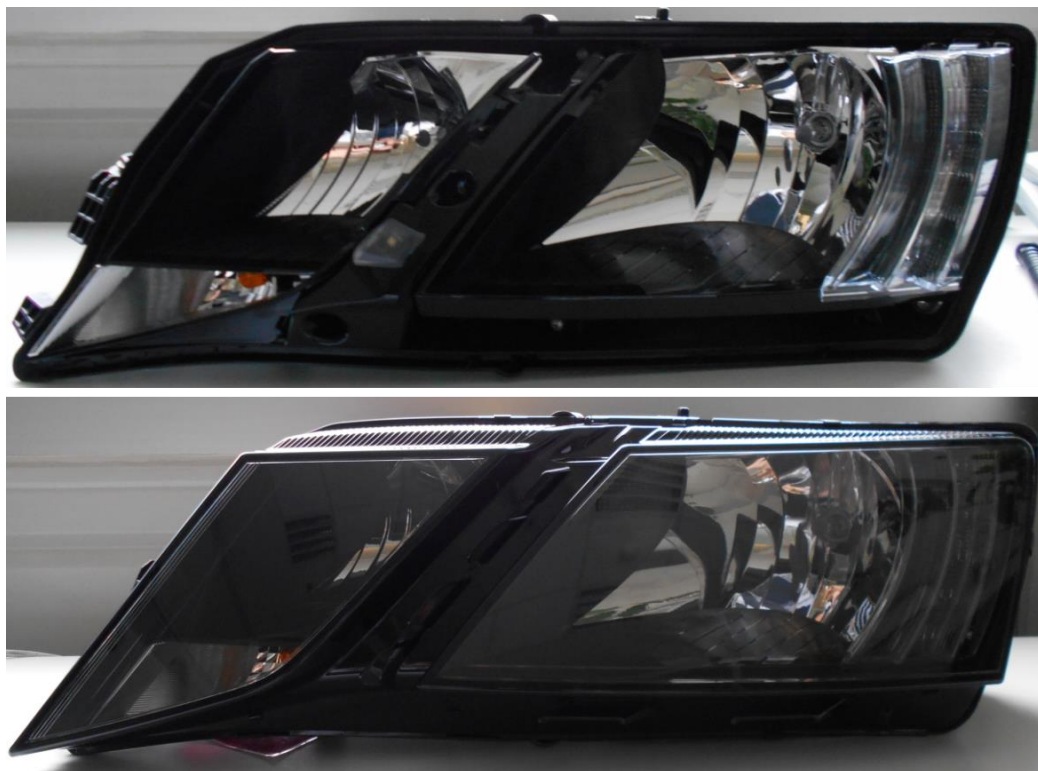
Na závěr celého výrobního procesu, se výrobek přes chladicí zónu, dostává do prostoru, kde je kvalifikovanými operátory sejmut z trnu dopravníku a podroben konečné kontrole viz obr. 2.11. Pokud výrobek kvalitativně vyhovuje, je vkládán do balení pro transport na montážní linky světlometů. V opačném případě je označen a odložen mezi zmetky.



Obr. 2.10 Kontrolní a balicí zóna

2.2 Dvoukomponentní vnější čočky

Současným fenoménem v oblasti výroby vnějších čoček světlometů jsou dvoukomponentní skla (dále jen 2k), kdy je kombinován čirý materiál s materiálem černým. Použití tohoto druhu skel je zpravidla přáním zákazníka. Černý materiál vytváří rámeček kolem čiré plochy a skrývá tak ve světlometu místa, jež nemají být viditelná viz obr. 2.12



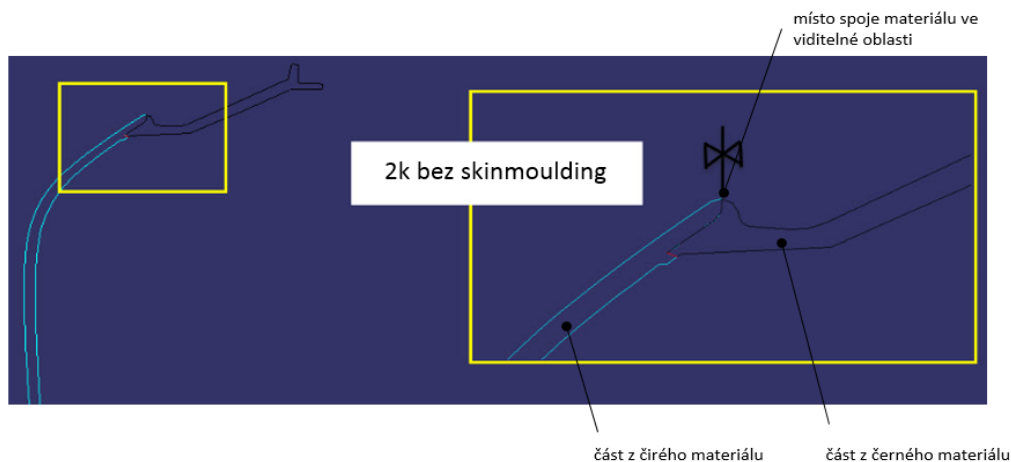
Obr. 2.12 Světlomet bez skla a se sklem

U 2k vnějších čoček jsou rozlišovány dva druhy konstrukce, jež se liší způsobem napojení čirého a černého materiálu.

2.2.1 2k skla se standardním konstrukčním řešením spoje dvou materiálů

Jde o standardní konstrukci, kdy materiály jsou v řezu spojeny prakticky v jednom bodě, jak je znázorněno na obr. 2.13. Z kvalitativního hlediska je pak tato linie spoje mezi dvěma materiály, běžící po celém obvodu skla, velmi riziková:

- velmi často v těchto místech dochází ke vzniku přetoků, které musí být manuálně ořezány. V případě tohoto standardního řešení jde zpravidla vždy o umístění spoje v oblasti, která v zástavbě světlometu do automobilu není nijak kryta, což ještě umocňuje rizikovost při vzniku vizuálních defektů;
- místo spoje je také přirozeným místem kumulování vnitřního pnutí, a proto bylo nutné zavést do procesu výroby následné temperování za účelem jeho snížení.



Obr. 2.13 Řez výrobkem v oblasti spoje dvou materiálů s využitím standardního konstrukčního řešení

2.2.2 2k skla s konstrukčním řešením spoje dvou materiálů - skinmoulding

Skinmoulding je označení pro konstrukční řešení spoje při vstřikování dvou materiálů, kde jsou vrstvy materiálu překryty (viz obr. 2.14). Toto řešení přináší několik výhod oproti klasickému spoji:

- výrobek získává, díky tomuto konstrukčnímu řešení spoje, lepší mechanické vlastnosti, zejména pak rázovou odolnost;
- viditelná linie spoje je v oblasti, jež je zpravidla, v zástavbě světlometu do vozu, skryta a při tom je eliminována i pravděpodobnost vzniku přetoku.

Místo spoje je také místem kumulování vnitřního pnutí, jež má být snižováno následnou temperací.



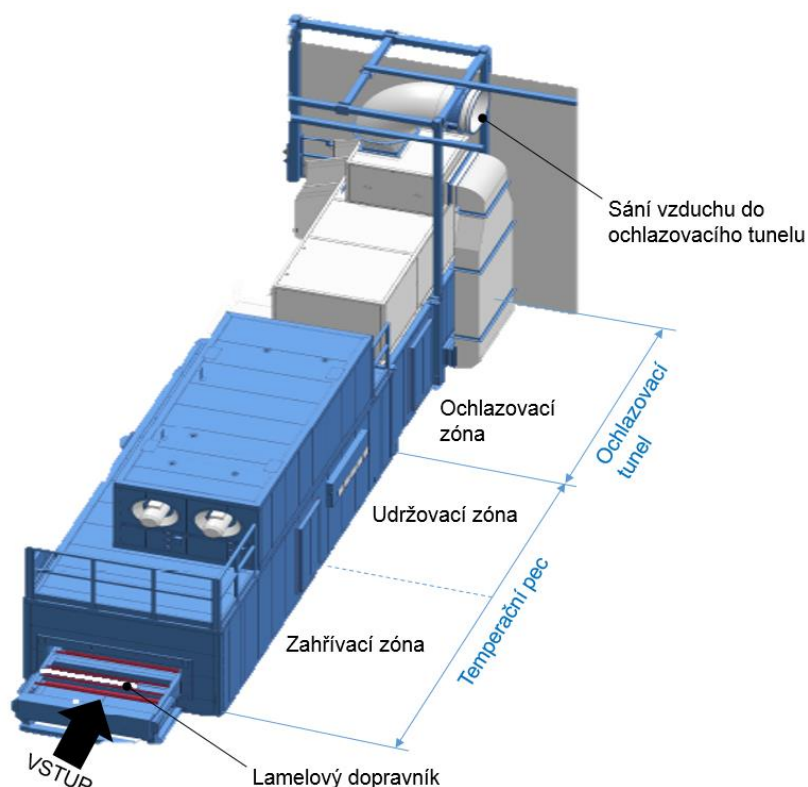
Obr. 2.14 Řez výrobkem v oblasti spoje dvou materiálů s využitím konstrukčního řešení skinmoulding

2.3 Temperační zařízení pro eliminaci vnitřního pnutí

Pro temperaci výrobků z polykarbonátu, za účelem eliminace vnitřního pnutí, se využívá průběžného zařízení, sestávajícího z pece pro uvolnění tepelného pnutí a na ni navazujícího tunelu, v němž je zajištěno postupné chladnutí výrobku. Tato sestava je doplněna lamelovým dopravníkem, který celým zařízením prochází a unáší výrobky, jež mají být podrobeny temperaci.

Ve své podstatě jde v tomto případě o proces, principiálně, velmi podobný procesu žíhání na odstranění vnitřního pnutí u výrobků z oceli.

Proces temperace za účelem uvolnění vnitřního pnutí začíná vložením výstřiků robotem, na dopravník do vstupního prostoru temperačního zařízení. Celé temperační zařízení se pak dá technologicky rozdělit do 3 zón, jejichž velikost (délka) je navržena tak, aby výstřik měl při průběžném průchodu zařízením, možnost strávit v každé z těchto zón požadovanou dobu.



Obr. 2.15 Temperační zařízení

2.3.1 Popis zón temperačního zařízení

Zahřívací zóna

V zahřívací zóně dochází k rychlému zahřátí výstřiku na požadovanou teplotu, která se blíží teplotě skelného přechodu zpracovávaného materiálu. Dosažitelná rychlost ohřevu je až 30°C za minutu.

Udržovací zóna

Ve druhé zóně, udržovací, je tato teplota udržována a probíhá zde tak hlavní proces eliminace vnitřního pnutí.

Ochlazovací zóna

V třetí zóně pak dochází k postupnému ochlazování výstřiku.

Po projití ochlazovací zónou se výstřiky dostávají na lamelovém dopravníku do konečné oblasti, kde jsou odebírány operátory

2.3.2 Základní části temperačního zařízení

Temperační zařízení, jehož model je na obr. 2.15, sestává ze dvou základních částí, v nichž probíhají zcela odlišné procesy. První částí je temperační pec, v níž probíhá ohřev produktů, a naopak jejich ochlazování se odehrává v druhé části, zvané jako ochlazovací tunel.

2.3.2.1 Temperační pec

Princip temperační pece je založen na proudění horkého vzduchu v uzavřeném okruhu tohoto zařízení. Vzduch je ohříván elektrickými, odporovými ohříváči umístěnými v horní části zařízení a vháněn výkonnými ventilátory do komory s predehřivací a udržovací zónou. Horký vzduch v komoře proudí od shora dolů, kde je pod úrovní dopravníku odsáván skrze regulovatelnou šterbinu odsávacího kanálu. Poté je přes filtrační systém znovu dopravován do horní části k odporovým ohříváčům a po dohřátí opět vháněn do temperační komory.

2.3.2.2 Ochlazovací tunel

Druhou základní částí temperačního zařízení pro odstranění vnitřního pnutí je ochlazovací tunel, který musí zajistit pozvolné, řízené ochlazování výstřiků. Právě pozvolné ochlazování má kladný vliv a eliminuje vznik tepelného vnitřního pnutí, jež je podrobněji popsáno v teoretické části.

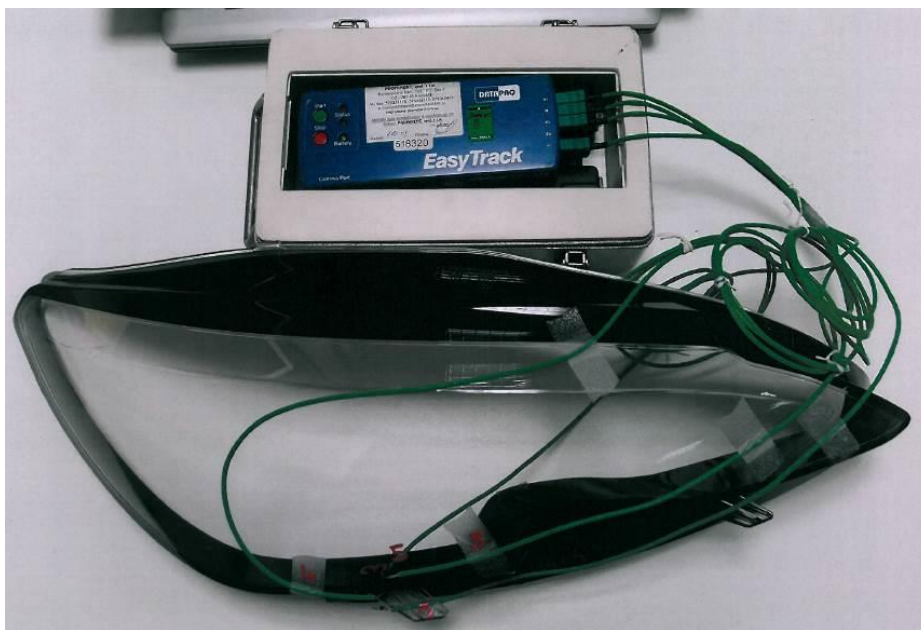
Princip funkčnosti ochlazovacího tunelu je založen na proudění chladného vzduchu v otevřeném okruhu. Vzduch je nasáván z vnějšího prostředí, filtrován a přes distribuční komoru vpravován do ochlazovacího tunelu. Ochlazovací vzduch v komoře proudí od shora dolů a v oblasti pod lamelovým dopravníkem je odsáván podobně jako v temperační peci. Po odsátí z ochlazovací komory je vzduch uvolněn zpět do vnějšího prostředí.

2.3.3 Nastavování pece a teplotní průběh

U temperačního procesu pro eliminaci vnitřního pnutí jsou nejzásadnější tři nastavitelné faktory.

- teplota v peci – pro regulaci dosahované úrovně zahřátí výrobku;
- rychlost ohřevu – pro nastavení doby, kterou výrobek stráví pod působením požadované teploty;
- rychlost proudění vzduchu v chladicím tunelu – pro regulaci rychlosti ochlazování výrobku

Nastavení parametrů na nejvhodnější hodnoty se provádí experimentálně, za využití termistorů upevněných na různých místech výrobku, jak je vidět na obr. 2.16. Díky tomuto vybavení je možné zaznamenat průběh teplot, jichž výrobek dosahuje při průjezdu temperační pecí a ochlazovacím kanálem. Takto získaná data slouží k nastavování celého procesu pro odstranění vnitřního pnutí, za cílem dosažení požadovaných hodnot vnitřního pnutí. Hodnoty vnitřního pnutí, jichž bylo dosaženo za aktuálně nastavených parametrů procesu, jsou souběžně ověřovány testem v tenzoaktivní lázni.



Obr. 2.16 Rozmístění termistorů na skle a měřicí zařízení DATAPAQ

Zpracování dat po nastavovacím průjezdu temperačním zařízením pro odstranění vnitřního pnutí

Výstupem ze softwaru měřicího zařízení DATAPAQ je graf, který je pro názornost na obr. 2.17. Pro měření byly v tomto případě využity 3 termistory, z nichž 2 byly připevněny na specifická místa na výrobku, a jeden volně měřil teplotu vzduchu v temperačním zařízení.

Graf zachycuje časový průběh teplot během průjezdu výrobku celým temperačním zařízením. Modrou barvou je vykreslený průběh teploty vzduchu, zelenou a červenou pak průběh teplot na výrobku.



Obr. 2.17 Grafický záznam průběhu teplot na výrobku, při průjezdu temperačním zařízením

2.4 Popis testu na přítomnost a velikost vnitřního pnutí

Pro určení velikosti vnitřního pnutí je využito testovací metody, kdy je výrobek ponořen do tenzoaktivní lázně.

Pro provádění testování je vyhrazeno místo v bezprostřední blízkosti vstřikovacích lisů. Testovací stůl s lázní je zachycen na obrázku 2.18.



Obr. 2.18 Pracoviště s tenzoaktivní lázní

Dle účelu následného použití výrobku jsou stanoveny hraniční hodnoty velikosti vnitřního pnutí takto:

- obecně platí, že by velikost vnitřního pnutí neměla překročit hranici 20 MPa;
- pro méně kritické výrobky je povolená velikost vnitřního pnutí mezi 10 MPa a 20 MPa;
- hodnota vnitřního pnutí pod 10 MPa je pak za běžných podmínek považována za optimální pro zaručení dostatečné odolnosti dílců proti defektu vlivem působení vnitřního pnutí;
- u výrobků, jež jsou pravidelně pod působením okolních vlivů a jsou například omývány, je maximální hranice pro hodnotu vnitřního pnutí 5 MPa [41].

Pro účel použití zvoleného konkrétního výrobku, vnějších čoček automobilových světlometů, je maximální povolená hranice vnitřního pnutí stanovena právě na 5 MPa [41].

2.4.1 Test na přítomnost vnitřního pnutí většího než 5 MPa

Pro testování výstřiku na přítomnost vnitřního pnutí většího než 5 MPa je použito roztoku propylenkarbonátu.

Testování spočívá v ponoření výstřiku do lázně propylenkarbonátu, a poté měření času do objevení prvních prasklinek (viz obr. 2.19). Vyhodnocení testu je posuzováno následovně:

- je-li čas do objevení prvních prasklin delší než 1 minuta, pak je hodnota vnitřního pnutí menší než 5 MPa;
- pro čas do objevení první praskliny v rozmezí 3–5 min do objevení první praskliny se uvádí hodnota vnitřního pnutí mezi 3,5–5 MPa;
- v případě, že se prasklina objeví dříve, než po uplynutí 1 minuty, bylo ve výrobku přítomno vnitřní pnutí o velikosti větší než povolených 5 MPa [41].



Obr. 2.19 Rozpraskaná skla po testu v tenzoaktivní lázni

Průběh testování

Dílce, které mají být testovány, nesmí mít žádné praskliny před začátkem testování. Určující pro tento test, jsou pouze praskliny, jež se objeví hned po ponoření do lázně. Ani praskliny, jež se objeví po další době po opláchnutí skla, již nejsou pro test relevantní [41].

Nepolakovaná a na pokojovou teplotu ochlazená 1 sada (jedno levé sklo a jedno pravé sklo), se ponoří do propylen karbonátové lázně o pokojové teplotě $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (krok 2 na obr. 2.20), v tomto okamžiku se spouští měření času. Probíhá pozorování výrobku v lázni až do momentu objevení první praskliny (krok 3 v obr. 2.20). V momentu objevení první praskliny je zastaveno měření času a výrobek je vyjmut z lázně a položen do odkapové vany (kroky 4 a 5). Naměřený čas je zapsán do statistické tabulky a tímto test končí. Pro ilustraci je zobrazeno sklo v kroku 6, kdy již došlo k jeho destrukci [41].



Obr. 2.20 Průběh testu na přítomnost vnitřního pnutí v tenzoaktivní lázni

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Při výrobě vnějších čoček automobilových světlometů, je jedním ze zásadních problémů přítomnost vnitřního pnutí v hotových výrobcích. Původ tohoto vnitřního pnutí i jeho negativní vliv na výrobek jsou podrobně popsány v teoretické části.

Pro eliminaci vnitřního pnutí se standardně využívá temperace výstřiků v temperačních pecích, což je ve své podstatě technologie obdobná, jako žíhání oceli. Efektivnost eliminace vnitřního pnutí temperací, je závislá na základních parametrech, které mají na výslednou hodnotu největší vliv.

- Čas
- Teplota
- Rychlost ochlazování

Vhodnou kombinací těchto parametrů je možné dosáhnout snížení vnitřního pnutí až pod požadovanou limitní hranici 5 MPa.

V současnosti existuje předpis pro nastavení temperačního zařízení, který u nově přichozího projektu zaručuje, že při nastavení parametrů na uvedené hodnoty, bude velikost vnitřního pnutí pod hranicí maxima, tedy bude vyhovující. Tento předpis pro nastavení parametrů temperačního zařízení na odstranění vnitřního pnutí byl vytvořen na základě velkého počtu měření během sériových, dlouhodobě běžících výrob. Nastavení parametrů pece na hodnoty, které jsou vymezeny předpisem, má zaručit hodnoty vnitřního pnutí o velikosti pod hranicí 5 MPa.

V praxi je předpis využíván, tak že s příchodem nového projektu, se temperační zařízení nastaví na v něm uvedené hraniční hodnoty, tedy horní úroveň teploty s časem a dolní úroveň rychlosti ochlazování. Parametry jsou však v průběhu výroby dále odlaďovány pro dosažení optimálních výsledků za současné minimalizace nákladů na provoz.

Při příchodu výroby nových dvoukomponentních skinmouldingových skel se ukázalo, že s nastavením všech uvedených parametrů na hodnoty na horní hranici dle stávajícího předpisu (viz tabulka 3.1), je možné dosáhnout uspokojivých hodnot vnitřního pnutí pouze v 60 % případů. Naměřené časové odezvy oscilují kolem hranice, jež představuje povolenou hodnotu vnitřního pnutí 5 MPa.

Tabulka 3.1 Úrovně parametrů dle stávajícího předpisu (vše vynásobeno koeficientem k).

Parametr	Dolní úroveň	Horní úroveň
Teplota	146,32°C	153,76°C
Čas	6,2 min	12,4 min
Rychlost ochlazení	6,2 K/min	18,6 K/min

Cílem experimentu je odhalit vlivnost jednotlivých parametrů na efektivitu temperačního procesu a nalézt nejvhodnější kombinaci parametrů pro dosažení co nejnižších hodnot vnitřního pnutí. Výsledky experimentu budou využity pro

vytvoření nového předpisu pro nastavení temperačního zařízení pro zpracovávání dvoukomponentních skinmouldingových skel.

Hodnocení parametrů je provedeno s využitím experimentální metody Design of Experiment (DoE).

Všechny hodnoty parametrů i naměřených odezev uvedených v experimentální části jsou z obchodních důvodů násobeny koeficientem k ($k > 0$).

3.1 Rozvržení experimentální části

Celý experiment sestává ze tří částí. Nejprve je provedeno demonstrativní měření velikosti vnitřního pnutí ve sklech se skinmouldingem, která byla temperována při nastavení nejlepších možných hodnot parametrů, dle stávajícího předpisu pro 2k skla. Hodnoty parametrů v tomto předpisu jsou dány interní normou.

Jako druhý je proveden experiment 1 u klasických 2k skel s nastavením temperačního zařízení také dle stávajícího předpisu. Cílem tohoto experimentu je určení vlivnosti každého ze sledovaných parametrů.

Na základě výsledků experimentu 1 bude provedena optimalizace dolní a horní hranice hodnot parametrů, dle kterých bude nastaveno temperační zařízení pro experiment 2. Tentokrát budou již testována skla vyrobená technologií 2k skinmoulding.

- Demonstrativní měření pro zjištění stavu za použití stávajícího předpisu pro nastavení temperačního zařízení na novou technologii vyráběné vnější čočky
- Experiment 1 – zjištění vlivu nastavitelných faktorů u 2k skel
- Experiment 2 – zjištění vlivu nastavitelných faktorů u 2k - skinmoulding

3.2 Demonstrativní měření

Je provedeno měření velikosti vnitřního pnutí na deseti náhodně vybraných 2k-skinmoulding. Tato skla byla tepelně zpracována v temperačním zařízení s parametry nastavenými na nejlepší možné hodnoty dle stávajícího předpisu (viz tabulka 3.2).

Tabulka 3.2 Hodnoty parametrů pro demonstrativní měření.

Parametr	Hodnota
Teplota	153,76°C
Čas	12,4 min
Rychlost ochlazení	6,2 K/min

Určování velikosti vnitřního pnutí je prováděno pomocí testu v tenzoaktivním prostředí, který je podrobněji popsán v kapitole 2.4. Vyhodnocení testu je založeno na měření času do objevení první praskliny. Požadavek je na vnitřní pnutí do 5MPa, čemuž odpovídá výdrž bez objevení praskliny delší než 60s.

Časy do objevení praskliny na deseti testovaných vzorcích jsou zaznamenány v tabulce 3.3. Z naměřených výsledných časů je patrné, že čtyři vzorky z deseti nesplňují požadavek na velikost vnitřního pnutí do 5 MPa. (Všechny uváděné hodnoty jsou z obchodních důvodů vynásobeny koeficientem k.)

Tabulka 3.3 Záznam naměřených odezev.

Číslo vzorku	Naměřený čas [s]
1	80,6
2	81,84
3	69,44
4	78,12
5	84,32
6	65,72
7	71,92
8	79,36
9	66,96
10	78,12

3.3 Experiment č. 1

Experiment 1 je proveden s 2k skly s klasickým konstrukčním řešením a parametry pece jsou nastaveny dle současného předpisu. Cílem experimentu 1 je určit vlivnost jednotlivých parametrů na výsledné hodnoty vnitřního pnutí.

3.3.1 Návrh experimentu č. 1

V experimentu, budou zkoumány tři faktory, které byly určeny jako nastavitelné a je možné tak dosáhnout jejich změnami určitých změn odezvy. Jde o faktor času, teploty a rychlosti ochlazování. Ostatní faktory, musí zůstat neměnné. Tyto tři vybrané faktory jsou dále označovány pouze písmeny A, B, C a budou testovány na dvou úrovních, jak je patrné v tabulce 3.4. Horní a dolní hranice faktorů byly převzaty ze současného předpisu pro nastavování temperačních pecí, platného pro klasická 2k skla.

Tabulka 3.4 Úrovně nastavitelných faktorů.

Faktor	Označení faktoru	Dolní úroveň	Horní úroveň
Čas	A	372 s	744 s
Teplota	B	146,32 °C	153,76 °C
Rychlost ochlazování	C	6,2 K/min	18,6 K/min

Faktor A – čas

Tento faktor představuje dobu, během níž je na výrobku držena požadovaná hodnota teploty. Spodní i horní úroveň byly stanoveny empiricky, kdy dlouhodobým sledováním bylo zjištěno, že držením požadované teploty v rozmezí 372-744 s, je vždy dosahováno hodnot velikosti vnitřního pnutí pod požadovanou limitní hranicí 5 MPa. Toto časové rozmezí platí pouze za předpokladu, že jsou i ostatní parametry nastaveny v předepsaných hranicích.

Faktor B – Teplota

Tento faktor definuje teplotu výrobku, která má být udržena pokud možno konstantní, během časového období definovaného faktorem A. Horní a dolní hranice

byly definovány také empiricky a to na 146,32 °C respektive 153,76 °C. Při udržení této teploty v povoleném rozptylu, je garantováno dosažení výsledného vnitřního pnutí pod požadovanou limitní hodnotou 5 MPa. Toto teplotní rozmezí platí pouze za předpokladu, že je dodrženo nastavení ostatních parametrů v předepsaných hranicích.

Faktor C – Rychlost ochlazování

Tento faktor definuje, jakou rychlostí je produkt v ochlazovacím tunelu následně ochlazován. Rozmezí je také stanoveno empiricky a to v oblasti od 6,2 K/min do 18,6 K/min.

Měřená odezva y_i

Pro zjištění velikosti vnitřního pnutí je využito testu na přítomnost vnitřního pnutí v tenzoaktivním prostředí, jehož podrobnější popis je v kapitole 2.4. Na základě tohoto způsobu testování je jako měřená odezva stanovena doba do objevení prvních prasklinek na výrobku. Odezva je měřena digitálními stopkami.

Pro jednodušší orientaci bude dále využito značení faktorů písmeny A, B, C, dle tabulky 3.5 a značení dolní úrovně faktoru hodnotou -1 a horní úrovně faktoru hodnotou 1.

Dle takto nadefinovaného zadání se jedná o třífaktorový experiment se dvěma úrovněmi faktorů. Pro získání relevantního výstupu, je třeba podrobit měření všechny možné kombinace faktorů. Tak bude do výsledků vstupovat i vzájemné ovlivňování faktorů, které je ale v tomto případě spíše nepravděpodobné.

Dle známých vstupních hodnot faktorů a požadavku na změnu pouze jednoho faktoru v každém kroku experimentu, lze určit počet kroků, jež musí být provedeny pro získání relevantního základu pro vyhodnocení experimentu.

2 úrovně pro každý z 3 faktorů $\rightarrow 2^3$ kroků = 8 kroků

Tabulka 3.5 Nastavení úrovní faktorů v jednotlivých krocích experimentu.

Pořadové číslo	Náhodné pořadí	Úrovně faktorů		
		A	B	C
1	2	-1	-1	-1
2	6	1	-1	-1
3	1	-1	1	-1
4	3	1	1	-1
5	8	-1	-1	1
6	7	1	-1	1
7	5	-1	1	1
8	4	1	1	1

Před zahájením provádění jednotlivých kroků experimentu je nutné stanovit těmto krokům náhodné pořadí. Eliminuje se tak vliv na měřenou odezvu, jež by mohl být způsoben postupnou úpravou vstupních faktorů. Například v případě postupného zvyšování teploty, nemusí být dosaženo nastavené teploty ve všech místech pece, což by mohlo ovlivnit prohřívání výrobku a následně i měřenou odezvu. Z tohoto

důvodu bude každá série kroků experimentu provedena v odlišném, náhodně zvoleném pořadí.

3.3.2 Provedení a analýza experimentu č. 1

Do jednotlivých řádků tabulky 3.6 jsou nyní zapsány i naměřené odezvy jednotlivých kroků y1 až y8 experimentu.

Tabulka 3.6 Zápis naměřených odezev.

Pořadové číslo	Náhodné pořadí	Úrovně faktorů			Odezva y1-y8 [s]
		A	B	C	
1	2	-1	-1	-1	y1 =112,84
2	6	1	-1	-1	y2=121,52
3	1	-1	1	-1	y3=236,84
4	3	1	1	-1	y4=239,85
5	8	-1	-1	1	y5=109,12
6	7	1	-1	1	y6=111,6
7	5	-1	1	1	y7=233,12
8	4	1	1	1	y8=234,16

3.3.2.1 Určení efektu zkoumaných faktorů v experimentu č. 1

Efekt jednotlivých faktorů na výstup procesu se počítá jako rozdíl průměrů odezev pro faktor nastavený na horní úroveň a pro faktor nastavený na dolní úroveň dle rovnic (3.1), (3.2) a (3.3) Pro zjednodušení zápisu bude použito označení dolní úrovně příslušného faktoru, písmenem tohoto faktoru a hodnotou 1, při nastavení na horní úroveň s hodnotou 2 viz převodní tabulka 3.7.

Tabulka 3.7 Značení dolních a horních úrovní faktorů.

Faktor	Dolní úroveň	Horní úroveň
A	A1	A2
B	B1	B2
C	C1	C2

Efekt faktoru A

$$Efekt_A = \overline{A2} - \overline{A1} = \frac{(y2+y4+y6+y8)}{4} - \frac{(y1+y3+y5+y7)}{4} \quad (3.1)$$

$$Efekt_A = \frac{(121,52+239,85+111,6+234,36)}{4} - \frac{(112,84+236,84+109,12+233,12)}{4} = 3,85$$

Efekt faktoru B

$$Efekt_B = \overline{B2} - \overline{B1} = \frac{(y3+y4+y7+y8)}{4} - \frac{(y1+y2+y5+y6)}{4} \quad (3.2)$$

$$Efekt_B = \frac{(236,84+239,85+233,12+234,36)}{4} - \frac{(112,84+121,52+109,12+111,6)}{4} = 122,27$$

Efekt faktoru C

$$Efekt_C = \overline{B2} - \overline{B1} = \frac{(y_5 + y_6 + y_7 + y_8)}{4} - \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{4} \quad (3.3)$$

$$Efekt_C = \frac{(109,12 + 111,6 + 233,12 + 234,36)}{4} - \frac{(112,84 + 121,52 + 236,84 + 239,85)}{4} = -5,71$$

3.3.2.2 Určení odezev vzájemných interakcí zkoumaných faktorů

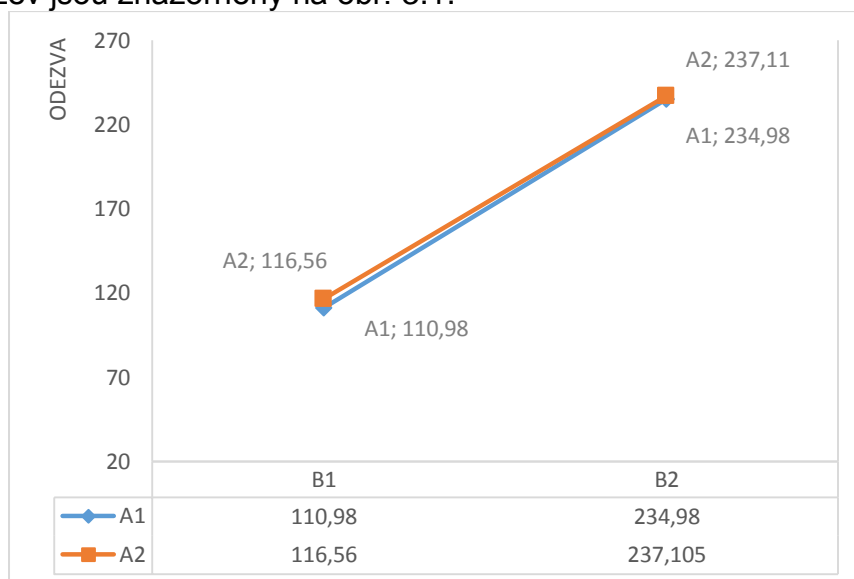
Zjištění vlivu vzájemných interakcí faktorů, je založeno na zanedbání jednoho ze tří vstupujících faktorů a shrnutí naměřených odezev pro dvojici. To znamená, že pro každou z kombinací faktorů jsou nyní k dispozici dvě naměřené odezvy, přičemž při jedné odezvě byla hodnota třetího faktoru vždy na spodní hranici, a při druhé odezvě na hranici horní.

Odezvy experimentu pro faktory A a B nezávisle na faktoru C.

Tabulka 3.8 Odezvy pro faktory A, B nezávisle na faktoru C.

Faktory		Odezvy	Průměrná odezva
A	B		
-1	-1	112,84; 109,2	110,98
1	-1	121,52; 111,6	116,56
-1	1	236,84; 233,12	234,98
1	1	239,85; 234,36	237,11

Průměry odezev jsou znázorněny na obr. 3.1.



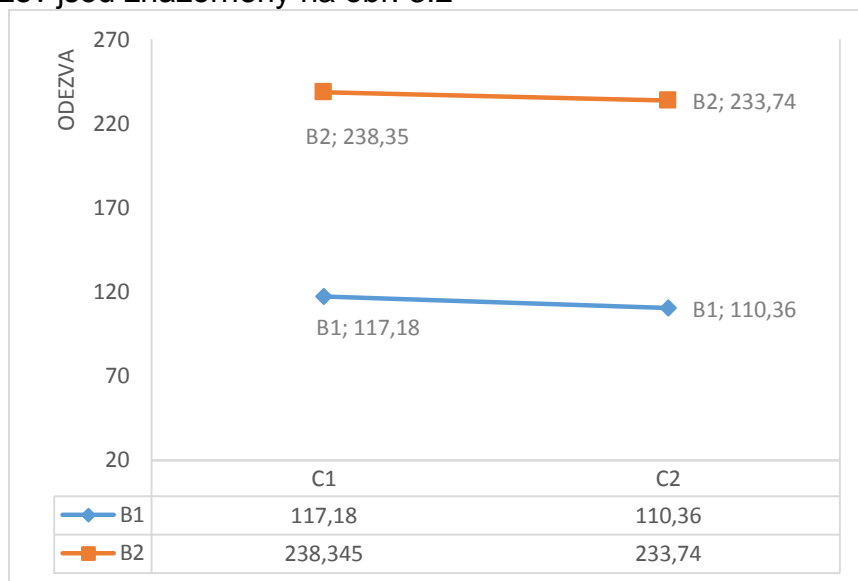
Obr. 3.1 Graf průměrů odezev ve vzájemné interakci faktorů A a B

Odezvy experimentu pro faktory B a C nezávisle na faktoru A.

Tabulka 3.9 Odezvy pro faktory B, C nezávisle na faktoru A.

Faktory		Odezvy	Průměrná odezva
B	C		
-1	-1	112,84; 121,52	117,18
1	-1	236,84; 239,85	238,35
-1	1	109,12; 111,6	110,36
1	1	233,12; 234,36	233,74

Průměry odezev jsou znázorněny na obr. 3.2



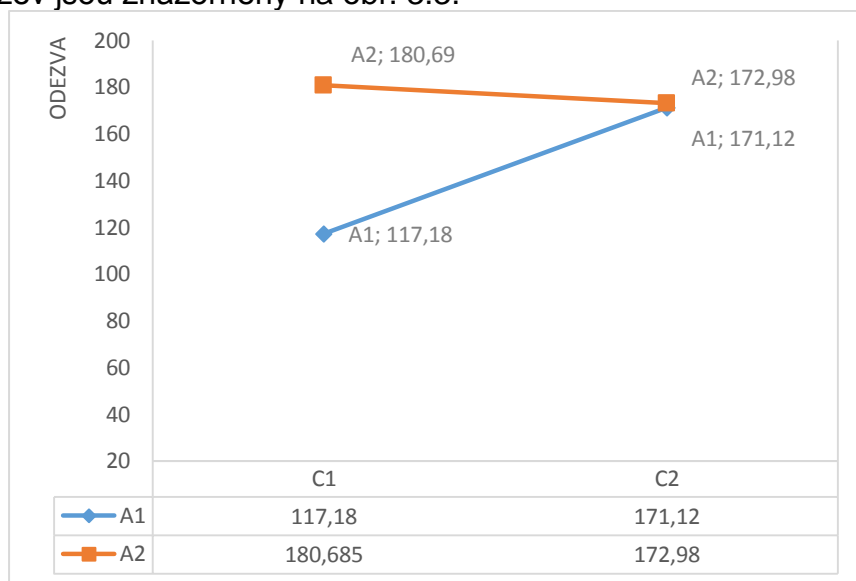
Obr. 3.2 Graf průměrů odezev ve vzájemné interakci faktorů B a C

Odezvy experimentu pro faktory A a C nezávisle na faktoru B.

Tabulka 3.10 Odezvy pro faktory A, C nezávisle na faktoru B.

Faktory			
A	C	Odezvy	Průměrná odezva
-1	-1	112,84; 121,52	117,18
1	-1	121,52; 239,85	180,69
-1	1	109,12; 233,12	171,12
1	1	111,6; 234,36	172,98

Průměry odezev jsou znázorněny na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Graf průměrů odezev ve vzájemné interakci faktorů B a C

Z grafů na obr. 3.1 a 3.2 je vidět, že mezi faktory A a B stejně jako mezi B a C žádná interakce neexistuje. Jinými slovy, lze dosáhnout velké změny nastavením faktoru B nebo C, téměř nezávisle na nastavení faktoru A. Z grafu na obr. 3.3 je naopak patrná tendence přímek se protnout, což předjímá možnou interakci mezi faktory A a C.

Úrovně jednotlivých interakcí se získávají vynásobením faktorů, jejichž interakci zkoumáme. Například vynásobením úrovní faktorů A a B dostaneme úroveň interakce AB. Úrovně interakcí tedy nelze nastavit libovolně, jsou dány nastavením úrovní jednotlivých faktorů. Všechny úrovně jsou zaznamenány v tabulce 3.11.

Tabulka 3.11 Úrovně parametrů u interakcí.

Pořadí	Faktory			Interakce		
	A	B	C	AB	AC	BC
1	-1	-1	-1	1	1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1
4	1	1	-1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1	-1	1
8	1	1	1	1	1	1

3.3.2.3 Určení efektu vzájemných interakcí zkoumaných faktorů

Dále je třeba určit efekty jednotlivých interakcí dle vzorců (3.4), (3.5) a (3.6), kde postup je obdobný jako u výpočtu efektů jednotlivých faktorů.

Efekt interakce AB

$$Efekt_{AB} = \overline{AB2} - \overline{AB1} = \frac{(y_1 + y_4 + y_5 + y_8)}{4} - \frac{(y_2 + y_3 + y_6 + y_7)}{4} \quad (3.4)$$

$$Efekt_{AB} = \frac{(112,84 + 239,85 + 109,12 + 234,36)}{4} - \frac{(121,52 + 236,84 + 111,6 + 233,12)}{4} = -1,73$$

Efekt interakce BC

$$Efekt_{BC} = \overline{BC2} - \overline{BC1} = \frac{(y_1 + y_2 + y_7 + y_8)}{4} - \frac{(y_3 + y_4 + y_5 + y_6)}{4} \quad (3.5)$$

$$Efekt_{BC} = \frac{(112,84 + 121,52 + 233,12 + 234,36)}{4} - \frac{(236,84 + 239,85 + 109,12 + 111,6)}{4} = 1,11$$

Efekt interakce AC

$$Efekt_{AC} = \overline{AC2} - \overline{AC1} = \frac{(y_1 + y_3 + y_6 + y_8)}{4} - \frac{(y_2 + y_4 + y_5 + y_7)}{4} \quad (3.5)$$

$$Efekt_{AC} = \frac{(112,84 + 236,84 + 111,6 + 234,36)}{4} - \frac{(121,52 + 239,85 + 109,12 + 233,12)}{4} = -1,99$$

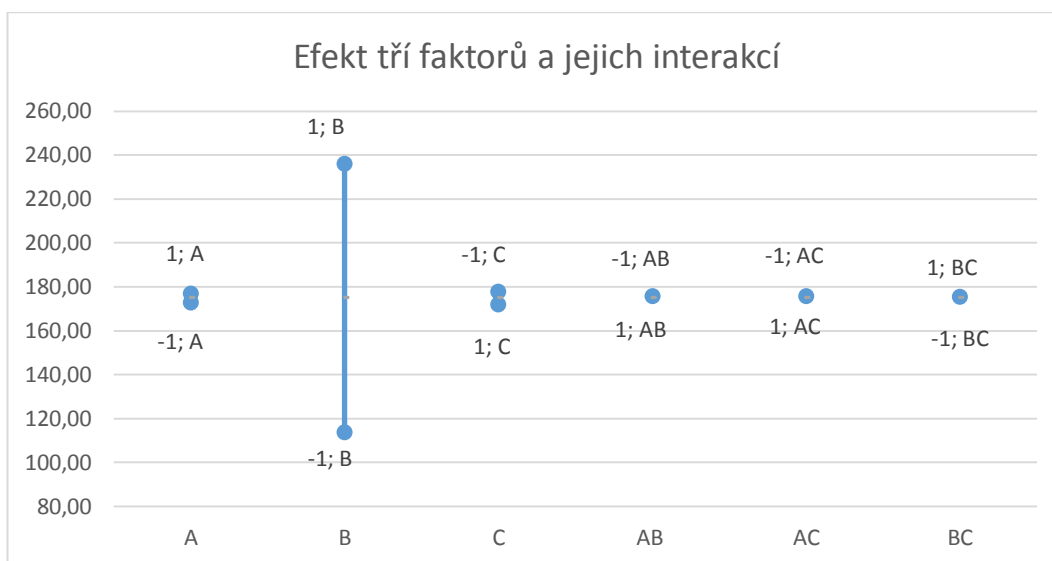
3.3.3 Zhodnocení experimentu č. 1

Podle údajů v tabulce 3.12 a a grafu na obr. 3.4 je patrné, že největší vliv na proces a tedy i výslednou odezvu má faktor B, následovaný faktorem A a C. Ačkoli v grafu 3 je evidentní sklon k interakci faktorů AC, tak při pohledu na výsledný graf je výsledný efekt této interakce zcela zanedbatelný.

Tabulka 3.12 Přehled odezev a afektů všech faktorů a interakcí experimentu č. 1.

		FAKTORY						INTERAKCE					
		A		B		C		AB		AC		BC	
Č. kroku	Odezva	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
1	112,84	112,84		112,84		112,84			112,84		112,84		112,84
2	121,52		121,52	121,52		121,52		121,52		121,52			121,52
3	236,84	236,84			236,84	236,84		236,84			236,84	236,84	
4	239,85		239,85		239,85	239,85			239,85	239,85		239,85	
5	109,12	109,12		109,12			109,12		109,12	109,12		109,12	
6	111,60		111,60	111,60			111,60	111,60			111,60	111,60	
7	233,12	233,12			233,12	233,12		233,12		233,12			233,12
8	234,36		234,36		234,36		234,36		234,36		234,36		234,36
SOUČET		691,92	707,33	455,08	944,17	711,05	688,20	703,08	696,17	703,61	695,64	697,41	701,84
PRŮMĚR		172,98	176,83	113,77	236,04	177,76	172,05	175,77	174,04	175,90	173,91	174,35	175,46
EFEKT		3,85		122,27		-5,71		-1,73		-1,99		-1,11	

Grafické znázornění efektů tří faktorů a všech jejich interakcí.



Obr. 3.4 Graf efektů tří faktorů a jejich interakcí

Závěrem tohoto experimentu je, že nejzásadnější vliv na velikost vnitřního pnutí má hodnota faktoru teploty. Pro dosažení jeho nejnižší hodnoty má být parametr teploty nastaven na horní úroveň. Poté při porovnání vlivnosti následuje faktor času, jenž by měl být nastaven také na horní úroveň. Nejmenší vliv ze tří hlavních faktorů má rychlost ochlazování, která by měla být nastavena na spodní úroveň.

3.4 Experiment č. 2

Na základě výsledku předchozího experimentu, z něž vyplývá, že nejlivnějším faktorem je teplota, budou nastaveny hranice druhého experimentu. Podstata druhého experimentu je v zásadě stejná jako u experimentu předchozího, jen bude zkoumaným předmětem 2k sklo s konstrukčním řešením spoje skinmoulding.

3.4.1 Návrh experimentu č. 2

V experimentu č. 2 budou zkoumány totožné faktory jako u experimentu předchozího.

Tabulka 3.13 Úrovně nastavitelných faktorů.

Faktor	Označení faktoru	Dolní úroveň	Horní úroveň
Čas	A	372 s	744 s
Teplota	B	153,76 °C	161,2°C
Rychlost ochlazování	C	6,2 K/min	18,6 K/min

Faktor A – čas

Tento faktor představuje dobu, během níž je na výrobku držena požadovaná hodnota teploty. Spodní i horní úroveň byly převzaty z minulého experimentu, protože ten prokázal, že jejich efekt na výslednou odezvu není v porovnání s efektem teploty tak významný. Proto je předpokládáno, že vymezení tohoto faktoru dolní hranicí na úrovni 372 s a horní hranicí na úrovni 744 s bude vyhovující i pro tento druhý experiment.

Faktor B – Teplota

Tento faktor definuje teplotu výrobku, která má být udržena pokud možno konstantní, během časového období definovaného faktorem A. Protože experiment 1 prokázal, že faktor času má nejvýznamnější vliv na výslednou odezvu a současně výsledkem experimentu 0 byly neuspokojivé hodnoty vnitřního pnutí, budou nastaveny horní a dolní hranice tohoto faktoru nově. Horní hranice faktoru bude nastavena na hodnotu 161,2°C, což je dle dlouhodobých zkušeností nejvyšší povolená teplota, na niž lze vyšetřované skla z polykarbonátu zahřát. Při překročení této teploty zpravidla dochází k nenávratným deformacím výrobků. Spodní hranice je pak nastavena na hodnotu 153,76 °C, což je teplota o níž demonstrační měření z úvodu experimentální části napovídá, že není ve 40 % případů vyhovující, za současného předpokladu, že u skel se skinmoulding bude platit obdobné rozdělení vlivnosti jednotlivých faktorů.

Faktor C – Rychlost ochlazování

Tento faktor definuje, jakou rychlostí je produkt v ochlazovacím tunelu následně ochlazován. Protože výsledný efekt faktoru rychlosti byl u experimentu 1 zjištěn jako nejmenší ze všech tří zkoumaných, bude pro experiment zachováno stejné zkoumané rozmezí hodnot. To je tedy stanoveno v oblasti od 6,2 K/min do 18,6 K/min.

3.4.2 Provedení a analýza experimentu č. 2

Značení faktorů A, B, C a značení horních a dolních úrovní faktoru bude použito obdobně jako u experimentu č.1 a pro přehlednost je znázorněno v tabulce 3.14. Protože je opět řešen experiment se třemi faktory a při tom každý na dvou úrovních, je experiment shodně jako experiment jedna rozdělen do osmi kroků

2 úrovně pro každý z 3 faktorů $\rightarrow 2^3$ kroků = 8 kroků

Tabulka 3.14 Zápis naměřených odezev.

Pořadové číslo	Náhodné pořadí	Úrovně faktorů			Odezvy y1 - y8
		A	B	C	
1	2	-1	-1	-1	y1 = 64,48
2	6	1	-1	-1	y2 = 106,64
3	1	-1	1	-1	y3 = 152,52
4	3	1	1	-1	y4 = 200,88
5	8	-1	-1	1	y5 = 60,76
6	7	1	-1	1	y6 = 75,64
7	5	-1	1	1	y7 = 115,32
8	4	1	1	1	y8 = 167,4

3.4.2.1 Určení efektu zkoumaných faktorů

Efekt jednotlivých faktorů na výstup procesu se počítá jako rozdíl průměrů odezev pro faktor nastavený na horní úroveň a pro faktor nastavený na dolní úroveň dle rovnic (3.1), (3.2) a (3.3). Pro zjednodušení zápisu bude použito označení dolní úrovně příslušného faktoru, písmenem tohoto faktoru a hodnotou 1, při nastavení na horní úroveň s hodnotou 2 viz převodní tabulka 3.15.

Tabulka 3.15 Značení dolních a horních úrovní faktorů.

Faktor	Dolní úroveň	Horní úroveň
A	A1	A2
B	B1	B2
C	C1	C2

Efekt faktoru A

$$Efekt_A = \overline{A2} - \overline{A1} = \frac{(y2 + y4 + y6 + y8)}{4} - \frac{(y1 + y3 + y5 + y7)}{4}$$

$$Efekt_A = \frac{(106,64 + 200,88 + 75,64 + 167,4)}{4} - \frac{(64,48 + 152,2 + 60,76 + 115,32)}{4}$$

$$= 31,75$$

Efekt faktoru B

$$Efekt_B = \overline{B2} - \overline{B1} = \frac{(y3 + y4 + y7 + y8)}{4} - \frac{(y1 + y2 + y5 + y6)}{4}$$

$$Efekt_B = \frac{(152,52 + 200,88 + 115,32 + 167,4)}{4} - \frac{(64,48 + 106,64 + 60,76 + 75,64)}{4}$$

$$= 82,15$$

Efekt faktoru C

$$Efekt_C = \overline{C2} - \overline{C1} = \frac{(y5 + y6 + y7 + y8)}{4} - \frac{(y1 + y2 + y3 + y4)}{4}$$

$$Efekt_C = \frac{(60,76 + 75,64 + 115,32 + 167,4)}{4} - \frac{(64,48 + 106,64 + 152,52 + 200,88)}{4} \\ = -26,35$$

3.4.2.2 Určení odezev vzájemných interakcí zkoumaných faktorů

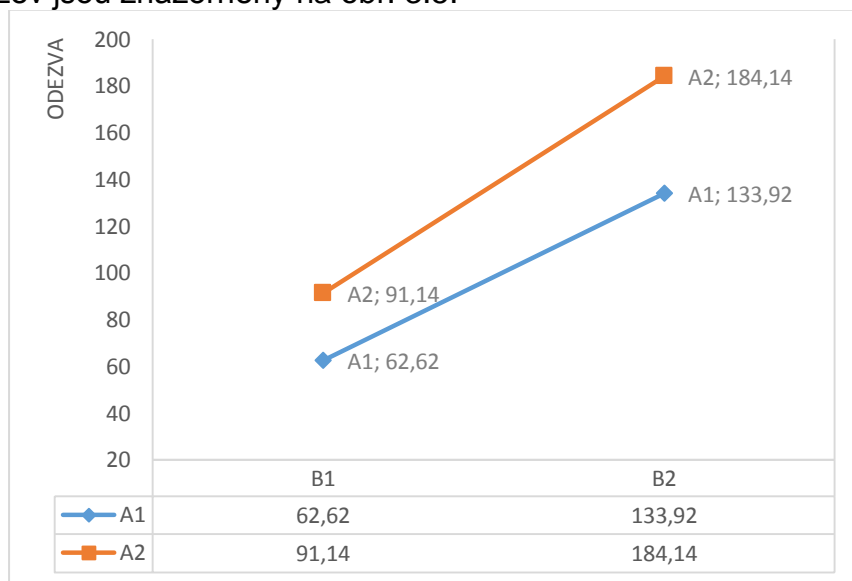
Zjištění vlivu vzájemných interakcí faktorů, je založeno na zanedbání jednoho ze tří vstupujících faktorů a shrnutí naměřených odezev pro dvojici. To znamená, že pro každou z kombinací faktorů jsou nyní k dispozici dvě naměřené odezvy, přičemž při jedné odezvě byla hodnota třetího faktoru vždy na spodní hranici a při druhé odezvě na hranici horní.

Odezvy experimentu pro faktory A a B nezávisle na faktoru C

Tabulka 3.16 Odezvy pro faktory A, B nezávisle na faktoru C.

Faktory		Odezvy	Průměr
A	B		
-1	-1	64,48; 60,76	62,62
1	-1	106,64; 75,64	91,14
-1	1	152,52; 115,32	133,92
1	1	200,88; 167,4	184,14

Průměry odezev jsou znázorněny na obr. 3.5.



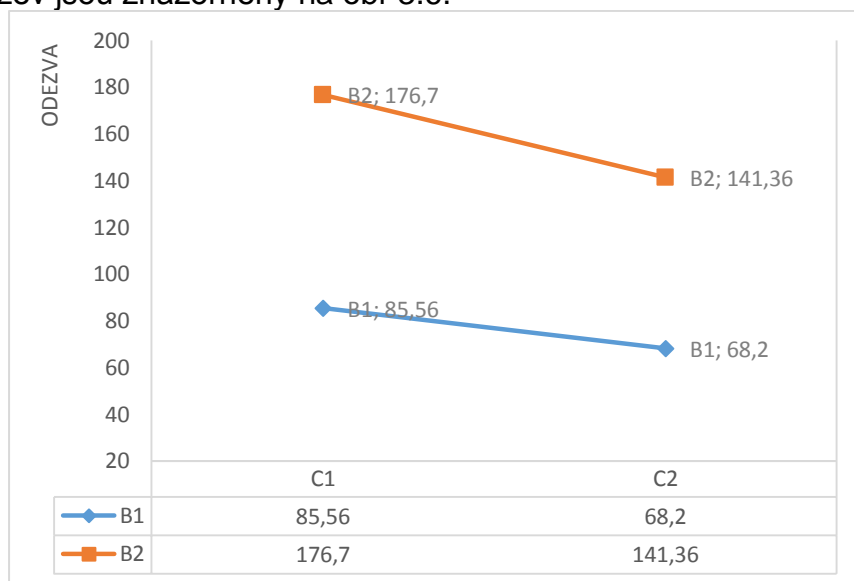
Obr. 3.5 Graf průměrů odezev ve vzájemné interakci faktorů A a B

Odezvy experimentu pro faktory B a C nezávisle na faktoru A

Tabulka 3.17 Odezvy pro faktory B, C nezávisle na faktoru A.

Faktory		Odezvy	Průměr
B	C		
-1	-1	64,48; 106,64	85,56
1	-1	152,52; 200,88	176,7
-1	1	60,76; 75,64	68,2
1	1	115,32; 167,4	141,36

Průměry odezev jsou znázorněny na obr 3.6.



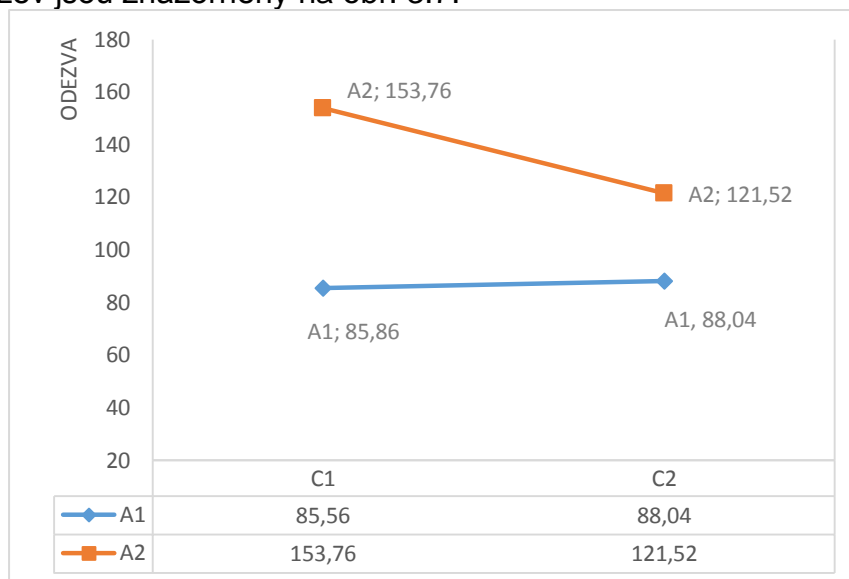
Obr. 3.6 Graf průměrů odezev ve vzájemné interakci faktorů B a C

Odezvy experimentu pro faktory A a C nezávisle na faktoru B

Tabulka 3.18 Odezvy pro faktory A, C nezávisle na faktoru B

Faktory		Odezvy	Průměr
A	C		
-1	-1	64,48; 106,64	85,56
1	-1	106,64; 200,88	153,76
-1	1	60,76; 115,32	88,04
1	1	75,64; 167,4	121,52

Průměry odezvy jsou znázorněny na obr. 3.7.



Obr. 3.7 Graf průměrů odezvy ve vzájemné interakci faktorů A a C

Z grafů na obr. 3.5 a 3.6 je vidět, že mezi faktory A a B stejně jako mezi B a C žádná interakce neexistuje. Jinými slovy, lze dosáhnout velké změny nastavením faktoru B, respektive C, téměř nezávisle na nastavení faktoru A. Z grafu 3.7 je naopak patrná tendence přímek se protnout, což dle naměřených hodnot předjímá interakci mezi faktory A a C.

Určení úrovní interakcí

Úrovně jednotlivých interakcí se získávají vynásobením faktorů, jejichž interakci zkoumáme. Například vynásobením úrovní faktorů A a B dostaneme úroveň interakce AB. Úrovně interakcí tedy nelze nastavit libovolně, jsou dány nastavením úrovní jednotlivých faktorů. Všechny úrovně jsou zaznamenány v tabulce 3.19.

Tabulka 3.19 Úrovně parametrů u interakcí.

Pořadí	Faktory			Interakce		
	A	B	C	AB	AC	BC
1	-1	-1	-1	1	1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1
4	1	1	-1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1	-1	1
8	1	1	1	1	1	1

3.4.2.3 Určení efektu vzájemných interakcí zkoumaných faktorů

Dále je třeba určit efekty jednotlivých interakcí, kde postup je obdobný jako u výpočtu efektů jednotlivých faktorů.

Efekt interakce AB

$$\begin{aligned}
 Efekt_{AB} &= \overline{AB2} - \overline{AB1} = \frac{(y_1 + y_4 + y_5 + y_8)}{4} - \frac{(y_2 + y_3 + y_6 + y_7)}{4} \\
 Efekt_{AB} &= \frac{(64,48 + 200,88 + 60,76 + 167,4)}{4} - \frac{(106,64 + 152,52 + 75,64 + 115,32)}{4} \\
 &= 10,85
 \end{aligned}$$

Efekt interakce BC

$$\begin{aligned}
 Efekt_{BC} &= \overline{BC2} - \overline{BC1} = \frac{(y_1 + y_2 + y_7 + y_8)}{4} - \frac{(y_3 + y_4 + y_5 + y_6)}{4} \\
 Efekt_{BC} &= \frac{(64,48 + 106,64 + 115,32 + 167,4)}{4} - \frac{(152,52 + 200,88 + 60,76 + 75,64)}{4} \\
 &= -8,99
 \end{aligned}$$

Efekt interakce AC

$$\begin{aligned}
 Efekt_{AC} &= \overline{AC2} - \overline{AC1} = \frac{(y_1 + y_3 + y_6 + y_8)}{4} - \frac{(y_2 + y_4 + y_5 + y_7)}{4} \\
 Efekt_{AC} &= \frac{(64,48 + 152,52 + 75,64 + 167,4)}{4} - \frac{(106,64 + 200,88 + 60,76 + 115,32)}{4} \\
 &= -4,75
 \end{aligned}$$

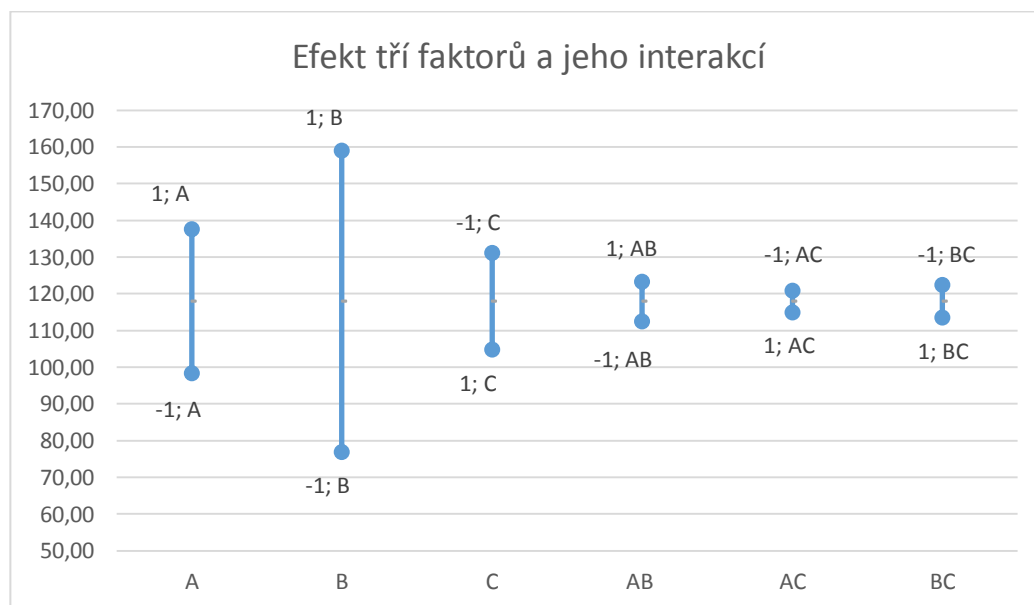
3.4.3 Zhodnocení experimentu č. 2

Podle údajů v tabulce 3.20 a a grafu na obr. 3.8 je patrné, že největší vliv na proces a tedy i výslednou odezvu má faktor B, následovaný faktorem A a C. Ačkoli v grafu 3 je evidentní sklon k interakci faktorů AC, tak při pohledu na výsledný graf je výsledný efekt této interakce zcela zanedbatelný.

Tabulka 3.20 Přehled odezev a afektů všech faktorů a interakcí experimentu č. 2.

Č. kroku	Odezva	Faktory						Interakce					
		A		B		C		AB		AC		BC	
		-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
1	64,48	64,48		64,48		64,48			64,48		64,48		64,48
2	106,64		106,64	106,64		106,64		106,64		106,64			106,64
3	152,52	152,52			152,52	152,52		152,52			152,52	152,52	
4	200,88		200,88		200,88	200,88			200,88	200,88		200,88	
5	60,76	60,76		60,76			60,76		60,76	60,76		60,76	
6	75,64		75,64	75,64			75,64	75,64			75,64	75,64	
7	115,32	115,32			115,32		115,32	115,32		115,32			115,32
8	167,4		167,4		167,4		167,4		167,4		167,4		167,4
SOUČET	943,64	393,08	550,56	307,52	636,12	524,52	419,12	450,12	493,52	483,6	460,04	489,8	453,84
PRŮMĚR	117,96	98,27	137,64	76,88	159,03	131,13	104,78	112,53	123,38	120,9	115,01	122,45	113,46
EFEKT		39,37		82,15		-26,35		10,85		-5,89		-8,99	

Grafické znázornění efektů tří faktorů a jejich interakcí na obr. 3.8



Obr. 3.8 Graf efektů tří faktorů a jejich interakcí

Závěrem tohoto experimentu je, že nejzásadnější vliv na velikost vnitřního prnutí má hodnota faktoru teploty. Pro dosažení jeho nejnižší hodnoty má být parametr teploty nastaven na horní úroveň. Poté při porovnání vlivnosti následuje faktor času, jenž by měl být nastaven také na horní úroveň. Nejmenší vliv ze tří hlavních faktorů má rychlost ochlazování, která by měla být nastavena na spodní úroveň.

4 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Ekonomické hodnocení bude provedeno na základě využití výsledků získaných z experimentů, a jejich aplikace při výrobě 2k vnějších čoček s konstrukčním řešením skinmoulding.

S využitím stávajícího předpisu pro nastavení temperačního zařízení a nastavením parametrů zařízení na uvedené maximální povolené hodnoty, bylo dosaženo výroby s potenciálně 40 % zmetkovitostí.

Na základě výsledků experimentu 2 je možno s jistotou konstatovat, že při nastavení parametrů na zde testované maximální hodnoty, bude dosaženo eliminace vnitřního pnutí v plném rozsahu. Zmetkovitost vlivem vnitřního pnutí se dostává na 0%.

Ekonomické zhodnocení je tedy postaveno na porovnání úspor dosažených snížením zmetkovitosti způsobené přítomností vnitřního pnutí o nepovolených hodnotách a zvýšením nákladů na temperační proces, kdy výrobky musí být zahřívány na vyšší teplotu.

4.1 Náklady na výrobu při parametrech dle stávajícího předpisu:

Náklady na elektrickou energii spotřebovanou pecí při ohřevu dle stávajícího předpisu:

- Spotřeba temperačního zařízení dle systému Energis: 85 kW/h
- Cena 1 kW/h: 3,80 Kč

Náklady na spotřebovanou elektrickou energii za 1h:

$$N_{E1} = 3,8 \cdot 85 = 323 \text{ Kč}$$

Vícenáklady vlivem zmetkovitosti při temperaci dle stávajícího předpisu:

- Průměrná cena skla bez laku: 77 Kč
- Zmetkovitost: 40%
- Takt dopravníku: 90 s
- Počet kusů skel na jednu dávku: 4 ks

Počet skel vyrobených za 1 hodinu:

$$P_V = \frac{3600}{90} \cdot 4 = 160 \text{ ks}$$

Z toho počet zmetků:

$$P_Z = 160 \cdot 0,4 = 64 \text{ ks}$$

Náklady na zmetky vlivem vnitřního pnutí za 1 hodinu výroby:

$$N_{Z1} = 64 \cdot 77 = 4928 \text{ Kč}$$

Celkové náklady na temperační proces za hodinovou produkci při nastavení parametru dle stávajícího předpisu:

$$N_{C1} = N_{E1} + N_{Z1} = 323 + 4928 = 5251 \text{ Kč}$$

4.2 Náklady na výrobu při nastavení nejvhodnějších parametrů testovaných v experimentu 2:

Náklady na elektrickou energii spotřebovanou pecí při nastavení na maximální testovací parametry dle experimentu 2

- Spotřeba temperačního zařízení dle systému Energis: 97 kW/h
- Cena 1 kW/h: 3,80 Kč

Náklady na spotřebovanou elektrickou energii za 1h:

$$N_{E2} = 3,8 \cdot 97 = 368 \text{ Kč}$$

Vícenáklady vlivem zmetkovitosti při temperaci dle stávajícího předpisu:

V rámci experimentu bylo při nastavených nejvhodnějších parametrech dosaženo zmetkovitosti vlivem přítomnosti vnitřního pnutí o nepovolené hodnotě 0%.

$$N_Z = 0 \text{ Kč}$$

Celkové náklady na temperační proces za hodinovou produkci při nastavení parametrů dle experimentu 2:

$$N_{C2} = N_{E2} = 368 \text{ Kč}$$

4.3 Ekonomické zhodnocení:

Nastavením pece na nejvhodnější kombinaci parametrů, zjištěnou v experimentu č. 2, je dosaženo úspory na nákladech:

$$U = N_{C1} - N_{C2} = 5251 - 368 = 4883 \text{ Kč}$$

To odpovídá teoretické úspoře:

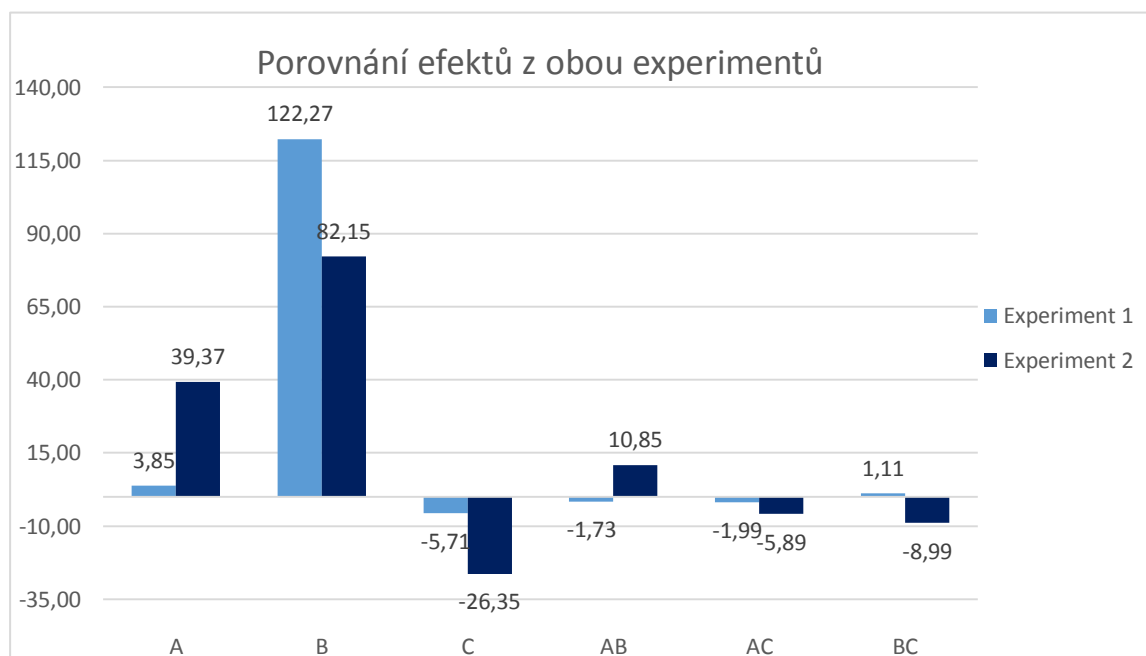
$$U = \frac{4883}{5251} \cdot 100 [\%] = 92,99 \%$$

5 DISKUSE

5.1 Rozbor a srovnání výsledků experimentu č. 1 a experimentu č. 2

Z komentářů k výsledkům experimentu 1 a experimentu 2 vyplývá, že v obou případech byla identifikována největší vlivnost teploty výrobku a jako méně vlivné se ukazují být rychlost ochlazování výrobku a čas, po který je teplota na výrobku udržována.

Při pohledu na graf v obrázku 5.1 je ovšem možné provést zajímavější srovnání experimentů. Světle modrou barvou jsou znázorněny výsledné efekty faktorů experimentu 1, tmavě modrou barvou efekty faktorů z experimentu 2. Efekty jsou srovnány v sobě odpovídajících dvojicích, takže je možné je přímo porovnat. Je tak patrné, že u experimentu 2 je efekt faktorů A a C o poznání významnější než u experimentu 1. Faktor A představuje dobu výdrže na nastavené teplotě a faktor C rychlost ochlazování produktu. V experimentu 2 byla použita vnější čočka s konstrukčním řešením skinmoulding. Takto vyrobená čočka má v oblasti překrytí obou vstřikovaných materiálů větší tloušťku než dvoukomponentní čočky se standardním konstrukčním řešením. Zřetelný nárůst efektů parametrů A a C je možné odůvodnit, tím že v případě větší tloušťky zahřívaného materiálu je třeba delší čas výdrže, pro zaručení dokonalého prohřátí, které u klasických dvoukomponentních skel s menší tloušťkou nebývá takový problém. Stejně tak rychlost ochlazování má na sklo s řešením skinmoulding větší vliv, kde se naopak nutnost co nejpomalejšího ochlazování dá odůvodnit požadavkem na co nejrovnoměrnější chladnutí materiálu v příčném průřezu výrobku.



Obr. 5.1 Porovnání efektů obou experimentů

ZÁVĚR

Předmětem této diplomové práce bylo, zjistit vlivnost parametrů na temperační proces, za účelem snížení vnitřního pnutí ve vnějších čočkách automobilových světlometů, vyrobených z polykarbonátu. Toto zadání vyplynulo ze situace, kdy byla zahájena výroba vzorků vnějších čoček s novým konstrukčním řešením a to překrytím dvou komponent, zvaným skinmoulding. Bylo zjištěno, že stávající předpis pro nastavení temperačního zařízení, u těchto nových vnějších čoček, přestává být použitelný. S nastavením parametrů dle stávajícího předpisu je dosahováno 40% zmetkovitosti. Experimentálně zjištěné výsledky v této práci poslouží jako základ pro vytvoření nového předpisu pro nastavování temperačních zařízení pro odstranění vnitřního pnutí u vnějších čoček s konstrukčním řešením skinmoulding.

- Výsledky experimentů prokázaly, že největší vliv na proces snižování vnitřního pnutí následnou temperací má teplota, na niž je výrobek temperován. Tento závěr je platný jak pro klasicky vyrobená dvoukomponentní skla, tak pro dvoukomponentní skla s konstrukčním řešením skinmoulding.
- Výsledný efekt faktorů času teplotní výdrže a rychlosti ochlazování, je při vzájemném porovnání výsledků obou experimentů, výrazně vyšší u vnějších čoček s konstrukčním řešením skinmoulding (10x resp. 5x). Tento fakt je nutné v budoucnu zohlednit při nastavování temperačních zařízení, protože doposud, faktorům času a rychlosti ochlazování, nebyla při výrobě klasických dvoukomponentních skel, věnována taková pozornost.
- V experimentu 2 bylo zjištěno, že při nastavení faktorů teploty a času na horní hranici a současně faktoru rychlosti ochlazování na jeho dolní hranici, je dosahováno snížení vnitřního pnutí pod danou limitní hranici 5 MPa. Na základě tohoto výsledku byla ekonomicky hodnocena výroba při nastavení těchto hraničních hodnot, kdy bylo dosaženo úspory na nákladech o 93% v porovnání s temperováním dle původního předpisu. U tohoto vyhodnocení je však nutné podotknout, že bylo provedeno pouze na základě výroby omezeného množství vzorků, daleko před započítáním výroby sériové.

Závěry tohoto experimentu budou využity pro vytvoření nového předpisu pro nastavování temperačních zařízení, jež budou nově zpracovávat dvoukomponentní vnější čočky, s konstrukčním řešením skinmoulding. K jeho vzniku povede ještě cesta protkaná spoustou dalších testovacích výrob a měření, nicméně zjištěné výsledné efekty nastavitelných parametrů, jsou pro následující ladění procesu stěžejní. Předpis pro nastavování temperačních zařízení zefektivní přípravu zařízení při příchodu každého nového projektu a určí optimální rozhraní hodnot parametrů, jež budou zaručovat snižování vnitřního pnutí ve vnějších čočkách pod maximální povolenou hranici. V konečném důsledku tak přispívá ke snížení zmetkovitosti výroby.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 8070806176.
2. Fyzikální základy vědy o materiálu. *PED MUNI - Sekce fyziky* [online]. Brno, 2004 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla>
3. *Makromolekulární látky (polymery)* [online]. [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <https://www.malloc.cz/chemie/mml.pdf>
4. Polymer definition and Examples. *ThoughtCo.* [online]. Anne Marie Helmenstine, 2017 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/definition-of-polymer-605912>
5. LEDERER, Jaromír. *POLYMER Y I* [online]. Ústí nad Labem, 2013 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/POLYMER Y2013.pdf>. Studijní materiál. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem.
6. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 17. www.publi.cz, 2015 [cit. 2017-03-01]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
7. BĚHÁLEK, Luboš.. *Polymery, plasty a jejich dělení* [online]. Liberec, 2004 [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p1/deleni%20polymeru.pdf. Studijní materiál. Technická univerzita v Liberci.
8. *E-ChemBook: Multimediální učebnice chemie* [online]. Jan Břízala, 2017 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/syntetické-makromolekulární-látky#Plasty>
9. KOLOUCH, Jan. *Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986
10. *Creative mechanisms: Everything you need to know about polycarbonate* [online]. Warminster, Philadelphia [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-polycarbonate-pc>
11. BĚHÁLEK, Luboš. *Přehled základních termoplastů, reaktoplastů a termoplastických elastomerů: Vlastnosti a inženýrské aplikace plastů* [online]. Liberec, 2006 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf. Skripta. Technická univerzita v Liberci.
12. J. KINCL, M. ŠRÁMEK, A. PÁNEK *Makromolekulární látky – Polykarbonáty*, Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 160s. Typové číslo L16a-B2-IV- 41/6586-VII. Vydání 1

-
13. JANČÁŘ, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5
 14. LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 20. L: www.publi.cz, 2015 [cit. 2017-03-19]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
 15. LENFELD, Petr. *Technologie II - zpracování plastů* [online]. Liberec [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm. Skripta. Technická Univerzita Liberec
 16. KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Vyd. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3
 17. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 9788073002503.
 18. SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. 19. www.publi.cz, 2015 [cit. 2017-04-05]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
 19. KROUPOVÁ, Marcela. *Problematika vnitřního pnutí v průmyslových výliscích z plastů* [online]. Most, 2008 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/69322>. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Michal Řepka.
 20. BOUKAL, Ivo. *Výzkum vnitřního pnutí a jeho stanovení v neprůhledných plastických hmotách*. SVÚM Praha 1966
 21. NEUHAUSL, Emil. *Vady výstřiků - 5. díl Skryté vady (vnitřní pnutí)*. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010, (101017) [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-5-dil-skryte-vady-vnitri-pnuti.html>
 22. NOŽIČKA, Jiří. *Sdílení tepla*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 8001015998.
 23. SAZIMA, Miroslav. *Sdílení tepla. Technický průvodce*. Praha: SNTL, 1993.//
 24. What's the Difference Between Conduction, Convection, and Radiation? *Machine Design* [online]. Carlos Gonzalez, 2015 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/whats-difference-between/whats-difference-between-conduction-convection-and-radiation>
 25. WHAT IS DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)? ASQ [online]. Keith M. Bower, 2014 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://asq.org/learn-about-quality/data-collection-analysis-tools/overview/design-of-experiments.html>
 26. *ISixSigma: Design of experiments - A Primer* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://www.isixsigma.com/tools-templates/design-of-experiments-doe/design-experiments-%E2%90%93-primer/>
-

-
27. AUSPERGER, Aleš. Technologie zpracování plastů [online]. 16. Liberec: www.publi.cz, 2015 [cit. 2017-04-20]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/?book=183-technologie-zpracovani-plastu>
28. HUSÁREK, Josef. *Makromolekulární látky, syntetické polymery* [online]. Olomouc, 2012 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: http://ucitelchemie.upol.cz/materialy/studijni_texty/vyukova_temata/plasty_text.pdf. Studijní materiál. Univerzita Palackého v Olomouci
29. NEUHAUSL, Emil. Polymery amorfni a semikrystalické z hlediska vstřikování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, , od str. 29 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/polymery-amorfni-a-semikrystalicke-z-hlediska-vstrikovani.htm>
30. BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 14. Liberec: www.publi.cz, 2015 [cit. 2017-04-23]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/02.html>
31. NEUHAUSL, Emil. Vady výstřiků - 6.díl, Skryté vady (orientace, struktura, nehomogenita). *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010, od str. 40 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-6-dil-skryte-vady-orientace-struktura-nehomogenita.html>
32. DEAN, Angela a Daniel. VOSS. *Design and analysis of experiments*. New York: Springer, 1999. ISBN 9780387985619.
33. ANTHONY, J.: *Design of Experiments for Engineers and Scientist*, Oxford: Elsevier; Science and Technology Books, 2003. 176 p. ISBN 075047094.
34. NAGY, I., PECHERKOVÁ, P.: *Statistika*. Praha: FD ČVUT, 2000. 151 s. dostupné z <http://nagy.rudolfpohl.cz/Statistika/Statistika.pdf>
35. SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi*. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-86229-15-7
36. WIBBEKE, Andrea a Volker SCHOPPNER. Fabrication of self-reinforced polycarbonate films. In: *SPE PRO* [online]. 2013 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.4spepro.org/view.php?article=005152-2013-10-30>
37. Plastic injection molding process. *Vulcan: Global manufacturing solutions* [online]. Shanghai, China, 2016 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.vulcanmold.com/article/Plastic-Injection-molding-process.html>
38. SVEČKO, Rajko, Dragan KUSIĆ, Tomaž KEK, Andrej SARJAŠ, Aleš HANČIČ a Janez GRUM. Acoustic Emission Detection of Macro-Cracks on Engraving Tool Steel Inserts during the Injection Molding Cycle Using PZT Sensors [online]. 2013 [cit. 2017-05-15]. DOI: 10.3390/s130506365. ISBN 10.3390/s130506365. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/5/6365/>
-

39. ARBURG. [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Bilder/Galerie_747px/22361_470U_clam_ping_unit.jpg
40. POSPÍŠIL, Ladislav. *Polymery a plasty v praxi* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2013/C3805/POLYMERY_A_PLASTY_V_PRAXI_MU_jaro_2013_C3805_1_18022013.pdf. Studijní materiál. Masarykova univerzita Brno.
41. Production specification, Interní dokument Automotive Lighting, FV-Nr.:1309919081. Reutlingen, 2014. 3s

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka / Symbol	Jednotka	Popis
DoE		Design of Experiment = Plánovaný experiment
T_g	°C	teplota skelného přechodu
F_p	N	přisouvací síla
F_u	N	uzavírací síla
T_f	°C	teplota předeřáté formy
T_t	°C	teplota taveniny
p_z	MPa	zbytková tlak
v_{vst}		vstřikovací rychlost
p_v	MPa	vstřikovací tlak
p_d	MPa	dotlak
t_{s1}	s	doba přísunu pohyblivé části formy a uzamknutí
t_{s2}	s	doba přísunu vstřikovací jednotky k formě
t_v	s	doba plnění (vstřikování)
t_{ch}	s	doba chlazení
t_d	s	doba dotlaku
t_{pl}	s	doba plastifikace nové dávky plastu
T_m	°C	
2k		dvoukomponentní materiál / výrobek
N_E	Kč	náklady na spotřebovanou el. Energii
P_v	ks	počet vyrobených skel
P_z	ks	počet zmetků
N_z	Kč	náklady
N_c	Kč	náklady - celkové
U	Kč	úspora